



ตัวควบคุมไฟที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการจีเนติกสำหรับดี-สแตดคอม

ขุนแผน ปฎิมาประกร

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มกราคม 2559

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม



ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการจีเนติกสำหรับดี-สแตดคอม

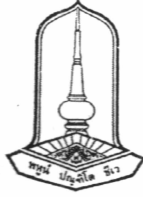
ขุนแผน ปฏิมาประกร

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มกราคม 2559

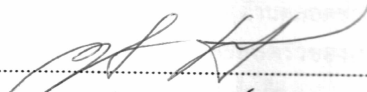
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม



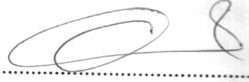


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายขุนแผน ปฎิมาประกร
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

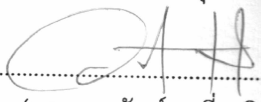
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....
(อาจารย์ ดร.ชลธิ์ โพธิ์ทอง)

ประธานกรรมการ
(กรรมการบัณฑิตศึกษาประจำคณะ)


.....
(รศ.ดร.อภินันท์ อูร์โสภณ)


กรรมการ
(อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก)


.....
(รศ.ดร.วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล)

กรรมการ
(อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)


.....
(ผศ.ดร.นิวัตร อังควิษฐพันธ์)


กรรมการ
(กรรมการบัณฑิตศึกษาประจำคณะ)


.....
(อาจารย์ ดร.กฤตยา สมสัย)

กรรมการ
(ผู้ทรงคุณวุฒิ)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ของมหาวิทยาลัย
มหาสารคาม


.....
(ศ.ดร.สัมพันธ์ ฤทธิเดช)


.....
(ศ.ดร.ประดิษฐ์ เทอดตุล)



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ อรุโสมถน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสี่ยงมิบูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะการจัดการ ด้านเนื้อหาและการทดสอบผลของงานวิจัย ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ชลธิ โปธิทอง ประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้ ข้อเสนอแนะการปรับปรุงเนื้อหา และขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.กฤตยา สมสัย กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ผู้เชี่ยวชาญด้าน Custom Power Devices (CPDs) ที่ได้ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาในรายละเอียดของงานวิจัยเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณบุพการีและขอบคุณพี่น้องทุกคนและครอบครัวของผู้ทำวิจัย ที่ให้กำลังใจและ คอยให้การสนับสนุนอย่างดียิ่งในทุกๆด้านตลอดช่วงเวลาที่ทำการศึกษา

ขอขอบคุณเพื่อนๆและครอบครัวของเพื่อนที่ให้กำลังใจและคอยให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน จนทำให้งานวิจัยนี้ได้ประสบผลสำเร็จ

ทางผู้จัดทำขอสำนึกในคุณค่าเอกสาร ตำราทางวิชาการ ของคณาจารย์และผู้เขียนทุกท่านที่ เกี่ยวข้อง ที่ทำให้ผู้จัดทำได้ดำเนินการเป็นผลสำเร็จด้วยความเคารพอย่างสูง นอกจากนี้ ยังมีบุคคลอีก หลายท่านที่ไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือในการจัดทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขุนแผน ปฎิมาประกร



ชื่อเรื่อง	ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการจีเนติกสำหรับดี-สแตตคอม
ผู้วิจัย	นายขุนแผน ปฎิมาประกร
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
กรรมการควบคุม	รองศาสตราจารย์ อภินันท์ อรุโสมถน รองศาสตราจารย์ วรวิวัฒน์ เสี่ยงมวิบูล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2559

บทคัดย่อ

การพัฒนาประเทศในด้านเศรษฐกิจและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาด้านเสถียรภาพ ความมั่นคงและปัญหาคุณภาพของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งปัญหาด้านคุณภาพของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือ ปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกิน

จากปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้างกล่าว ผู้วิจัยได้นำอุปกรณ์ดี-สแตตคอม (D-STATCOM) ซึ่งจะมีลักษณะต่อขนานเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามาใช้แก้ปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแบบจำลองและการออกแบบตัวควบคุมอุปกรณ์ดี-สแตตคอม สำหรับการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัสเนื่องจากการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกหรือแรงดันไฟฟ้าเกิน แบบจำลองที่ได้ถูกใช้สำหรับการออกแบบชุดควบคุมกระแสและชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของดี-สแตตคอม โดยชุดควบคุมกระแสใช้หลักการการควบคุมแบบอีทเตอร์รีชีส ในขณะที่ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงใช้ตัวควบคุมแบบพีและไอ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมใช้วิธีการค่าเหมาะสมที่สุดที่จุดสมดุล และส่วนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัสนั้น การออกแบบจะใช้ตัวควบคุมแบบพีและไอทำงานร่วมกับตัวชดเชยเฟสนำหน้าและล่าหลัง โดยค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับถูกค้นหาด้วยวิธีการจีเนติก

ระบบที่นำเสนอถูกจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลของการจำลองแสดงให้เห็นว่า อุปกรณ์ดี-สแตตคอมและชุดควบคุมที่ออกแบบสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส อันเนื่องมาจากเกิดแรงดันไฟฟ้าตกหรือแรงดันไฟฟ้าเกิน ภายในข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE std. 1159-1995

คำสำคัญ : การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ; ดีสแตตคอม ; จีเนติก อัลกอริธึม

TITLE Optimal PI Controller using Genetic Algorithm for D-STATCOM



AUTHOR Khunpan Patimaprakorn
DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Electrical and Computer Engineering.
ADVISORS Assoc. Prof. Apinan Aurasopon, Ph.D.
Assoc. Prof. Worawat Sangeimvibun, Ph.D.
UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2016

ABSTRACT

Nowadays economic development and continuously expanded industrial sectors can increase the needs of more electric power and can lead to stability and quality problems of electric power in power distribution systems which have the most quality problem in sag and swell voltage problem.

All electrical power quality problems as above mentioned, Distribution STATCOM (D-STATCOM) was used in a parallel circuit with the power distribution system to solve the power quality problem. This research presents the model and design of D-STATCOM controller for maintaining desired voltage level at the load bus. Through the sag and swell voltage in power distribution system, the model was used for designing current control and dc voltage control of D-STATCOM. Regarding the use of controller, a hysteresis control was used for the current control and proportional-integrated (PI) controllers were used the dc voltage control. The symmetry optimum method was used to determine parameter value of the controller. PI controllers which work together with the phase lead and lag compensators were used for designing to control ac voltage at the load bus. The value of parameter the ac voltage control ac was examined by using genetic algorithm method.

The presented model was imitated by using MATLAB/Simulink program. The results shown that D-STATCOM device and the designed control circuits achieved maintaining the current voltage level at the load buses because arising of low or over voltage within requirement of the standard of Institute of Electric and Electronics Engineering (IEEE) standard 1159 – 1995.

Key Words : Voltage regulation ; D-STATCOM ; Genetic algorithm



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพประกอบ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย	6
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	6
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล	8
2.1 คุณภาพของกำลังไฟฟ้า (Power Quality)	8
2.1.1 สภาวะชั่วครู่ (Transients)	9
2.1.2 การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงสั้น (Short duration voltage variation)	10
2.1.3 การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงยาว (Long duration voltage variation)	11
2.1.4 แรงดันไม่สมดุล (Voltage unbalance)	12
2.1.5 ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น (Waveform distortion)	12
2.1.6 แรงดันกระเพื่อม (Voltage fluctuation)	14
2.2 อุปกรณ์คัสทอมเพาเวอร์ (Custom Power Devices: CPDs)	14
2.2.1 ชนิดจัดโครงสร้างโครงข่ายใหม่ (Network reconfiguring type)	15
2.2.1.1 อุปกรณ์จำกัดกระแสโซลิดสเตต (Solid state current limiter: SSCL)	15
2.2.1.2 โซลิดสเตตเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Solid state circuit breaker: SSCB)	15
2.2.1.3 สวิตช์ถ่ายโอนโซลิดสเตต (Solid state transfer switch: SSTS)	16
2.2.2 CPDs ที่เป็นชนิดการชดเชย (Compensating type)	16
2.2.2.1 ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต (Dynamic voltage restorer: DVR)	16
2.2.2.2 ตัวปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าแบบรวม	



(Unified Power Quality Conditioner: UPQC)	19
2.2.2.3 ดี-สแตตคอม (D-STATCOM)	20
2.3 หลักการทำงานของดี-สแตตคอม	21
2.4 การควบคุมการทำงานของดี-สแตตคอม	26
2.4.1 การควบคุมแบบเลื่อนเฟส (Phase shift control)	27
2.4.2 การควบคุมแบบกำหนดความถี่ (Carrier Based PWM Control)	27
2.4.3 การควบคุมแบบอีทีเทอร์รี่ซีส (Carrier Less Hysteresis Control)	31
2.5 วิธีการจีเนติก (Genetic algorithm)	34
2.5.1 วัฏจักรการทำงานของจีเนติกอัลกอริทึม	35
2.5.2 ขั้นตอนการทำงานของ GA	36
2.5.2.1 การเข้ารหัสโครโมโซม (Chromosome coding)	37
2.5.2.2 กระบวนการทางพันธุกรรม (Genetic operation)	37
2.5.2.3 การคำนวณค่าความเหมาะสม (Fitness computation)	38
2.5.2.4 ขั้นตอนการเลือก (Selection)	39
2.5.2.5 การแทนที่ (Replacement)	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	41
3.1 แบบจำลองของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า	41
3.2 การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โพลบัส	45
3.3 การออกแบบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวิธีการดั้งเดิม	49
3.4 แบบจำลองของดีสแตตคอมและการควบคุม	54
3.4.1 ชุดควบคุมกระแสแบบอีทีเทอร์รี่ซีสของอุปกรณ์ดีสแตตคอม	58
3.4.2 ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	60
3.4.3 ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วย GA	62
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	68
4.1 แบบจำลองของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า	68
4.2 การออกแบบตัวควบคุมของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวิธีการ GA	69
4.2.1 ผลการทดสอบพารามิเตอร์ด้วยวิธี GA , PSO, SISO	71
4.2.2 ผลการทดสอบที่แรงดันตก 0.5 p.u ด้วยวิธี GA	72
4.2.3 ผลการทดสอบพารามิเตอร์ด้วยวิธี GA , PSO, SISO	74
4.2.4 ผลการทดสอบสภาวะแรงดันตกที่ระดับต่างๆ โดยใช้พารามิเตอร์ 0.5 p.u. ด้วยวิธี GA	76



	ฉ
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	80
5.1 สรุปผลการศึกษา	80
5.1.1 อุปกรณ์ CPDs	80
5.1.2 การควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ดี-สแตดคอม	80
5.1.3 การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ดี-สแตดคอม	81
5.2 ข้อเสนอแนะ	81
เอกสารอ้างอิง	83
ภาคผนวก	87
ภาคผนวก ก หนังสือรับรองการตีพิมพ์จากวารสาร มทร.อีสาน	88
ภาคผนวก ข บทความที่รอตีพิมพ์วารสาร มทร.อีสาน	90
ประวัติย่อผู้วิจัย	106



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1.1 ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าและสาเหตุของการเกิดปัญหาปัญหาคุณภาพ	1
ตาราง 2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงสั้น	11
ตาราง 2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงยาว	12
ตาราง 3.1 พารามิเตอร์ของระบบจำหน่าย	50
ตาราง 3.2 พารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีค่าเหมาะสมที่สุดที่จุด	62
ตาราง 4.1 ค่าที่ปรับตั้งในวิธีการ GA ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink	69
ตาราง 4.2 ค่าพารามิเตอร์ $K_i, K_p, T_{Lead}, T_{Lag}$ ระหว่างวิธีการ GA , PSO และ SISO	70
ตาราง 4.3 ค่าพารามิเตอร์ในสภาวะแรงดันตกด้วยวิธี GA	76



สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1.1 ลักษณะการเชื่อมต่อของดี-สแตตคอม	2
ภาพประกอบ 1.2 โครงสร้างของดี-สแตตคอมเมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า	3
ภาพประกอบ 1.3 ลักษณะการเชื่อมต่อของ DVR	3
ภาพประกอบ 1.4 โครงสร้างของ DVR เมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า	4
ภาพประกอบ 1.5 ลักษณะการเชื่อมต่อของ UPQC	4
ภาพประกอบ 1.6 โครงสร้างของ UPQC เมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า	5
ภาพประกอบ 1.7 โครงสร้างการทำงานของดี-สแตตคอมสำหรับวิธีการควบคุม PWM	5
ภาพประกอบ 2.1 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเกิดอิมพัลส์ชั่วคราวเกิดโดยฟ้าผ่า	9
ภาพประกอบ 2.2 ผลของสภาวะการแกว่งชั่วคราว	10
ภาพประกอบ 2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันช่วงระยะสั้น	10
ภาพประกอบ 2.4 แรงดันไม่สมดุล	12
ภาพประกอบ 2.5 รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยน	13
ภาพประกอบ 2.6 รอยบากที่เกิดขึ้นจากการทำงานของคอนเวอร์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	14
ภาพประกอบ 2.7 โครงสร้างของอุปกรณ์ SSCL	15
ภาพประกอบ 2.8 โครงสร้างของอุปกรณ์ SSCB	15
ภาพประกอบ 2.9 โครงสร้างของอุปกรณ์ SSTS	16
ภาพประกอบ 2.10 โครงสร้างวงจรไฟฟ้าเฟสเดียวของ DVR	17
ภาพประกอบ 2.11 โครงสร้างของ DVR เมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า	17
ภาพประกอบ 2.12 ไดอะแกรมของระบบที่เชื่อมต่อด้วย DVR	18
ภาพประกอบ 2.13 โครงสร้างของ UPQC ทางด้านขาและด้านซ้าย	20
ภาพประกอบ 2.14 วงจรสมมูลของ UPQC ทางด้านขาและด้านซ้าย	20
ภาพประกอบ 2.15 โครงสร้างดี-สแตตคอมเมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า	20
ภาพประกอบ 2.16 โครงสร้างของดี-สแตตคอมเมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า	22
ภาพประกอบ 2.17 ดี-สแตตคอมทำหน้าที่ชดเชยให้กับโหลด	23
ภาพประกอบ 2.18 ดี-สแตตคอมในขณะทำงานเพื่อรักษาระดับแรงดัน	24
ภาพประกอบ 2.19 วงจรแปลงผันแรงดันแบบสองระดับ	24
ภาพประกอบ 2.20 โครงสร้างดี-สแตตคอมแบบแหล่งจ่ายกระแส 3 เฟส 3 สาย	25
ภาพประกอบ 2.21 โครงสร้างดี-สแตตคอมแบบ H-bridge หรือ แบบ 1 เฟส 2 สาย	25
ภาพประกอบ 2.22 โครงสร้างของตัวติดตามเฟส PLL	26
ภาพประกอบ 2.23 โครงสร้างการควบคุมแบบเลื่อนเฟสของดี-สแตตคอม	27



ภาพประกอบ 2.24	โครงสร้างการควบคุมแบบกำหนดความถี่	28
ภาพประกอบ 2.25	โครงสร้างการควบคุมแบบ PI สำหรับอีทเตอร์รีซีส	31
ภาพประกอบ 2.26	วัฏจักรการทำงานของ GA	35
ภาพประกอบ 2.27	ขั้นตอนการทำงานของ GA	37
ภาพประกอบ 2.28	การเข้ารหัสโครโมโซมแบบเลขฐานสอง	37
ภาพประกอบ 2.29	การข้ามสายพันธ์แบบจุดเดียว	38
ภาพประกอบ 2.30	การกลายพันธ์แบบจุดเดียว	38
ภาพประกอบ 2.31	วิธีการคัดเลือกแบบวงล้อเสี่ยงทาย	39
ภาพประกอบ 3.1	ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งดี-สแตดคอม	41
ภาพประกอบ 3.2	วงจรสมมูลของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งดี-สแตดคอม	42
ภาพประกอบ 3.3	การวางแผนของกรอบอ้างอิง	44
ภาพประกอบ 3.4	โครงสร้างการควบคุมแบบ SISO	49
ภาพประกอบ 3.5	บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุม	50
ภาพประกอบ 3.6	โบทพอดไดอะแกรม	52
ภาพประกอบ 3.7	ผลการตอบสนองของระบบ	52
ภาพประกอบ 3.8	โบทพอดไดอะแกรมของระบบที่ $K_i = -4.136$	53
ภาพประกอบ 3.9	ผลการตอบสนองของระบบที่ $K_i = -4.136$	53
ภาพประกอบ 3.10	การรักษาแรงดันที่โหลดบัสที่แรงดันตก 0.5 p.u. เมื่อ $K_i = -1$ และ $K_i = -4.136$	54
ภาพประกอบ 3.11	วงจรสมมูลที่จุด v_i ของดี-สแตดคอม	54
ภาพประกอบ 3.12	โครงสร้างของดี-สแตดคอมและการควบคุม	58
ภาพประกอบ 3.13	การควบคุมกระแสแบบอีทเตอร์รีซีสของดี-สแตดคอม	59
ภาพประกอบ 3.14	บล็อกไดอะแกรมของ v_{dc}	60
ภาพประกอบ 3.15	ไดอะแกรมของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	60
ภาพประกอบ 3.16	ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	63
ภาพประกอบ 3.17	กระบวนการทำงานของจีเนติก	64
ภาพประกอบ 4.1	แบบจำลองของระบบที่ใช้ทดสอบในโปรแกรม MATLAB/Simulink	68
ภาพประกอบ 4.2	ชุดควบคุมการทำงานดี-สแตดคอม	69
ภาพประกอบ 4.3	การลู่เข้าของคำตอบด้วยวิธี GA	70
ภาพประกอบ 4.4	การรักษาแรงดันตกที่ 0.5 p.u. ของวิธี SISO, GA และ PSO	71
ภาพประกอบ 4.5	การรักษาแรงดันตกที่ 1.1 p.u. ของวิธี SISO, GA และ PSO	71
ภาพประกอบ 4.6	แรงดันที่โหลดบัสก่อนและหลังการชดเชยสถานะแรงดันตก 0.5 p.u.	72
ภาพประกอบ 4.7	แรงดัน V_s ที่แรงดันตก 0.5 p.u.	72
ภาพประกอบ 4.8	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันตก 0.5 p.u.	73



ภาพประกอบ 4.9	กระแส 3 เฟส ของดี-สแตดคอมที่แรงดันตก 0.5 p.u.	73
ภาพประกอบ 4.10	ฮาร์มอนิกส์ที่แรงดันตก 0.5 p.u.	73
ภาพประกอบ 4.11	แรงดันที่โหลดบัสก่อนและหลังการชดเชยสภาวะแรงดันเกิน 1.1 p.u.	74
ภาพประกอบ 4.12	แรงดัน V_s ที่แรงดันเกิน 1.1 p.u.	74
ภาพประกอบ 4.13	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันเกิน 1.1 p.u.	75
ภาพประกอบ 4.14	กระแส 3 เฟส ของดี-สแตดคอมที่แรงดันเกิน 1.1 p.u.	75
ภาพประกอบ 4.15	ฮาร์มอนิกส์ที่แรงดันเกิน 1.1 p.u.	76
ภาพประกอบ 4.16	แรงดันที่โหลดบัสสภาวะแรงดันตก 0.6 p.u.	77
ภาพประกอบ 4.17	แรงดันที่โหลดบัสสภาวะแรงดันตก 0.7 p.u.	77
ภาพประกอบ 4.18	แรงดันที่โหลดบัสสภาวะแรงดันตก 0.8 p.u.	77
ภาพประกอบ 4.19	แรงดันที่โหลดบัสสภาวะแรงดันตก 0.9 p.u.	78
ภาพประกอบ 4.20	แรงดันที่โหลดบัสสภาวะแรงดันเกิน 1.1 p.u.	78



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากการพัฒนาทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสังคมมีอัตราเพิ่มสูงขึ้น ตลอดจนการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง เป็นเหตุให้มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านเสถียรภาพและความมั่นคงกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเช่น ปัญหาด้านการเพิ่มขีดจำกัดการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า และยังคงส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายอีกด้วย คุณภาพกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE std. 1159-1995, 1995 นั้นหมายถึง ลักษณะของกระแส แรงดัน และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟในสภาวะปกติที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานที่ผิดพลาดหรือเสียหาย ปัญหาคุณภาพของกำลังไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังตาราง 1.1 ดังนี้

ตาราง 1.1 ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าและสาเหตุของการเกิดปัญหา

ประเภท	ชนิด	สาเหตุที่ก่อให้เกิด
สภาวะชั่วคราว	อิมพัลส์ชั่วคราว	ฟ้าผ่า และการตัดต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า
	การแกว่งชั่วคราว	การปลดหรือต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ เช่น ตัวเก็บประจุหรือหม้อแปลงไฟฟ้า
การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันช่วงระยะสั้น	แรงดันตกช่วงสั้น	ความผิดพลาด และการตัดต่อโหลด
	แรงดันเกินช่วงสั้น	ความผิดพลาดแบบเฟสเดียวลงดิน
	ไฟฟ้าดับช่วงสั้น	ความผิดพลาด
การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะยาว	แรงดันตก	การตัดต่อโหลด หรือมีการปลดตัวเก็บประจุ
	แรงดันเกิน	การปลดโหลด หรือมีการต่อตัวเก็บประจุ
	ไฟฟ้าดับ	ความผิดพลาด
แรงดันไม่สมดุล		ความไม่สมดุลของโหลดในแต่ละเฟส
ความผิดเพี้ยนรูปคลื่น	องค์ประกอบไปตรง	การใช้อุปกรณ์เรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น
	ฮาร์มอนิก	โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น
	คลื่นรบกวน	การทำงานของวงจรแปลงผัน



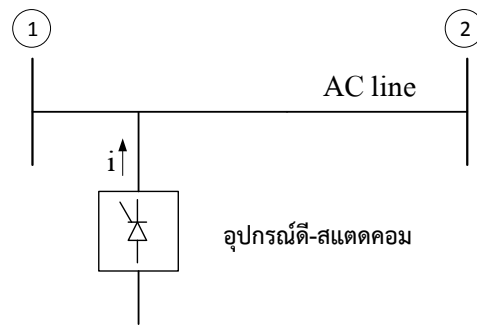
แรงดันกระแสเพิ่ม		การใช้อุปกรณ์ประเภทเตาหลอมแบบอาร์ก
------------------	--	------------------------------------

จากปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่พบนั้น จึงได้มีการนำระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้ (Flexible AC transmission technology: FACT) ใช้ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้มีความสามารถในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว และทำให้โหมดการแกว่งหรือตกของแรงดันไฟฟ้าในสายส่ง ถูกปรับปรุงให้มีคุณภาพมากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดได้อย่างปลอดภัย อย่างไรก็ตาม FACT ยังมีข้อจำกัดการทำงานในด้านของอุปกรณ์ เช่น ความร้อนและความเร็วในการสวิตช์ จากการพัฒนาเทคโนโลยีด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง จึงได้นำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ที่มีลักษณะการทำงานคล้ายกับ FACT และเรียกอุปกรณ์เหล่านี้ว่าอุปกรณ์คัสตอมเพาเวอร์ (Custom power devices: CPDs) ด้วยเทคโนโลยีดังกล่าว สามารถทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ผู้บริโภคได้อย่างมีคุณภาพ CPDs จึงเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการแก้ปัญหาของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่พบเสมอ เช่น การเกิดแรงดันตกและแรงดันเกิน เป็นต้น (Hingorani *et al.*, 1995) CPDs สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิดคือชนิดจัดโครงสร้างโครงข่ายใหม่ (Network reconfiguring type) และชนิดการชดเชย (Compensating type)

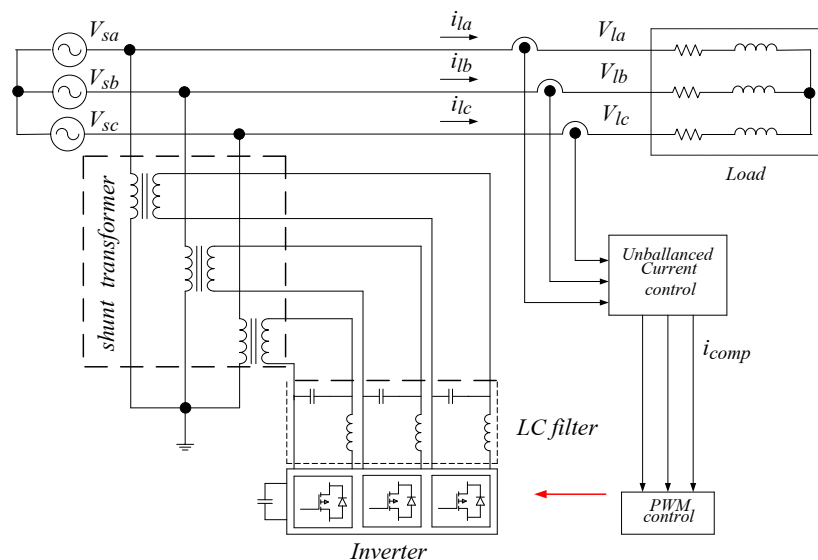
อุปกรณ์คัสตอมเพาเวอร์ที่สำคัญ ได้แก่

1. สเตตคอมระบบจำหน่ายหรือนิยมเรียกว่าดี-สเตตคอม (D-STATCOM) ดี-สเตตคอม จะต่อขนานกับระบบที่ต้องการทำการชดเชย หากทำการต่อเข้าร่วมกับโหลดบัสดี-สเตตคอมจะทำหน้าที่ชดเชยให้กับโหลดเช่น การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า การกรองฮาร์มอนิกและการปรับโหลดให้สมดุล เป็นต้น และหากทำการต่อดี-สเตตคอมเข้ากับบัสแรงดันดี-สเตตคอมจะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันที่บัสนั้นๆ ซึ่งการทำงานในโหมดนี้จะสามารถรักษาระดับแรงดันที่บัส ในขณะที่เกิดความไม่สมดุลให้มีแรงดันที่สมดุลได้ ข้อดีของดี-สเตตคอมคือสามารถฉีดกระแสที่ไม่สมดุลหรือกระแสฮาร์มอนิก เพื่อกำจัดกระแสโหลดที่ไม่สมดุล หรือกำจัดฮาร์มอนิกของกระแสโหลด และในบางครั้งดี-สเตตคอมยังทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายอีกหน้าที่หนึ่งด้วย ลักษณะการเชื่อมต่อและโครงสร้างของดี-สเตตคอมแสดงได้ดังภาพประกอบ 1.1 และ 1.2





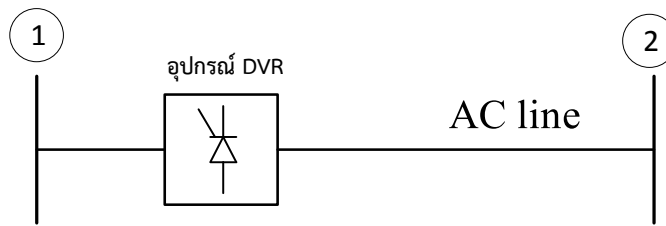
ภาพประกอบ 1.1 ลักษณะการเชื่อมต่อของดี-สแตคคอม



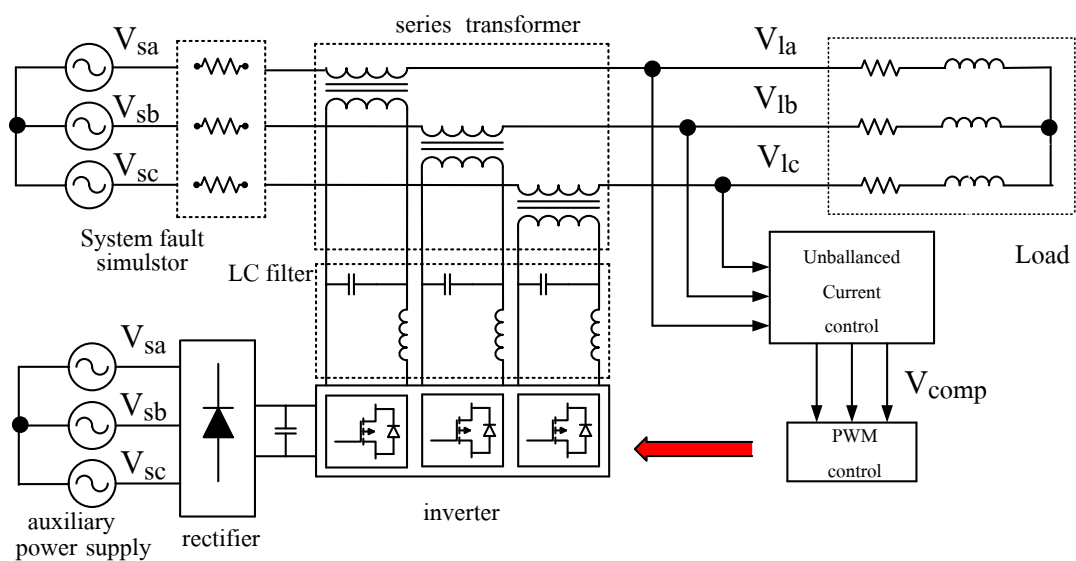
ภาพประกอบ 1.2 โครงสร้างของดี-สแตคคอมเมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

2. ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต (Dynamic voltage restore: DVR) จุดประสงค์หลักของ DVR คือป้องกันโวลตความไวสูง เนื่องจากการเกิดแรงดันตกหรือแรงดันเกินช่วงสั้น หรือจากการเกิดไฟฟ้าดับ ด้านแหล่งจ่าย DVR สามารถแทรกแรงดันอนุกรมเข้ากับระบบได้อย่างรวดเร็ว เพื่อทำหน้าที่ชดเชยให้กับโวลต เมื่อเกิดแรงดันตกหรือแรงดันเกินช่วงสั้น นอกจากนี้ DVR ยังสามารถทำหน้าที่เป็นตัวกรองอนุกรมแบบแอคทีฟ (Series active filter) นอกจากนี้เมื่อเกิดแรงดันผิดเพี้ยนด้านแหล่งจ่ายแรงดัน DVR ยังสามารถแทรกแรงดันที่ผิดเพี้ยนเพื่อหักล้างกับแรงดันฮาร์โมนิกได้อีกด้วย ลักษณะการเชื่อมต่อและโครงสร้างของ DVR แสดงได้ดังภาพประกอบ 1.3 และ 1.4





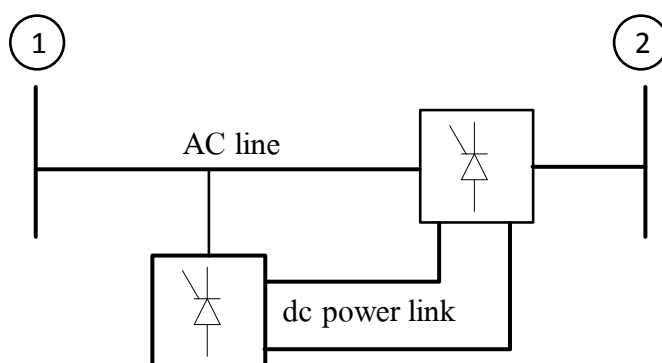
ภาพประกอบ 1.3 ลักษณะการเชื่อมต่อของ DVR



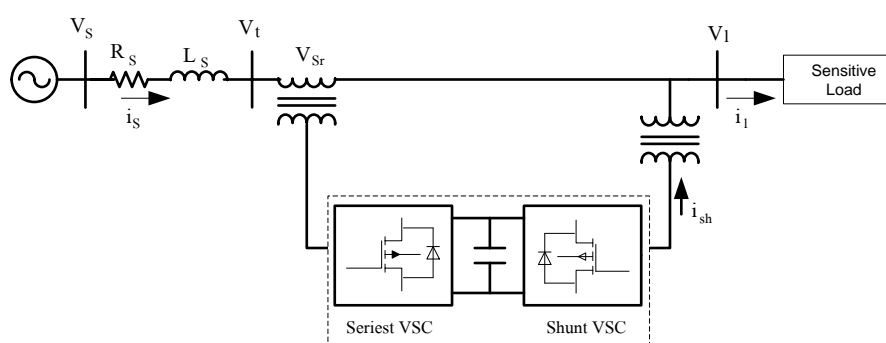
ภาพประกอบ 1.4 โครงสร้างของ DVR เมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

3. ตัวปรับสภาวะคุณภาพกำลังไฟฟ้าแบบรวม (Unified power quality conditioner: UPQC) เป็นโครงสร้างที่ต่อแบบขนานและอนุกรมที่ได้รวมเอาข้อดีของดี-สแตตคอมและ DVR เข้าด้วยกัน UPQC เป็นอุปกรณ์ที่มีความคล่องตัวสูง ที่สามารถฉีดกระแสและแทรกแรงดันเข้าระบบได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถทำงานได้ทั้งเป็นตัวชดเชยให้กับโหลด และเป็นอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันในขณะเดียวกัน นอกจากนี้ UPQC สามารถที่จะแทรกแรงดันหรือกระแสไม่สมดุลและกระแสผิดเพี้ยนเข้าไปในระบบได้ ลักษณะการเชื่อมต่อและโครงสร้างของ UPQC แสดงได้ดังภาพประกอบ 1.5 และภาพประกอบ p1.6





ภาพประกอบ 1.5 ลักษณะการเชื่อมต่อของ UPQC



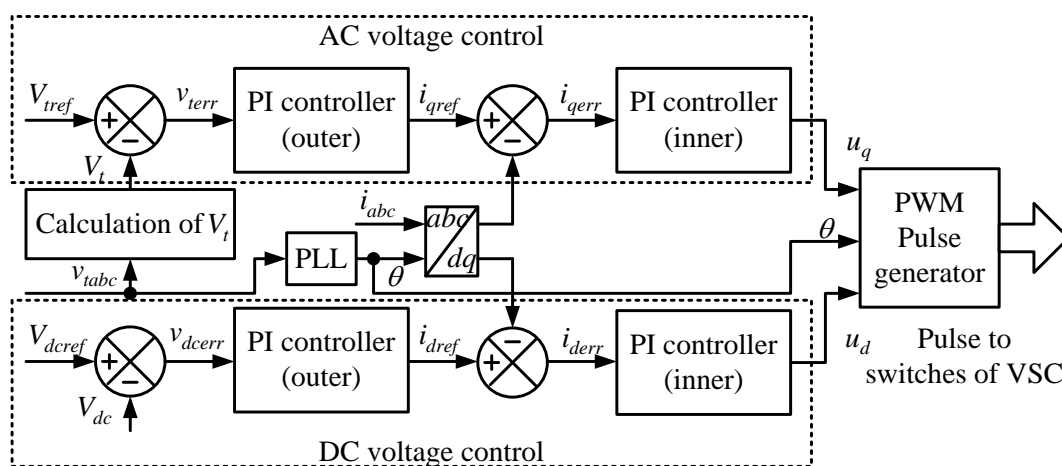
ภาพประกอบ 1.6 โครงสร้างของ UPQC เมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

อุปกรณ์ CPDs ที่สำคัญทั้ง 3 แบบนั้น ดี-สแตตคอมมีข้อได้เปรียบในการต่อขนานกับระบบจำหน่ายและมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ทำให้สามารถทำการติดตั้งเพิ่มเติม โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบจำหน่ายมากนัก และยังไม่ต้องการแหล่งจ่ายช่วย (Auxiliary power supply) จากภายนอกมาใช้ในการทำงาน เพราะใช้พลังงานที่เก็บสะสมไว้ในตัวเก็บประจุเชื่อมโยงในการชดเชยแรงดัน ส่วน DVR นั้นจะใช้พลังงานจากตัวเก็บประจุหรือแหล่งจ่ายช่วยหรือจากสายส่งที่เชื่อมต่อขนานกับอินเวอร์เตอร์ โดยทั้งหมดเป็นแหล่งจ่ายกระแสตรง ในขณะที่ UPQC มีโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้เกิดความยากในการควบคุมการทำงาน ด้วยเหตุนี้ดี-สแตตคอมจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ศึกษา เนื่องจากระบบมีความคล่องตัวที่มากกว่าและมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้นำดี-สแตตคอมมาทำการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Kittaya, 2012) การใช้ดี-สแตตคอมใช้ในการชดเชยโหลดและชดเชยฮาร์มอนิก (Akagi *et al.*, 2007) ส่วนใหญ่จะใช้ระบบควบคุมกระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง บนกรอบอ้างอิง dq ในการควบคุมบนกรอบอ้างอิง dq ตัวควบคุมกระแสใช้การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional: P)



และปริพันธ์ (Integral: I) ทำให้มีชุดควบคุมของดี-สแตตคอมทั้งหมด 4 ชุด นอกจากนี้ในการควบคุมบนกรอบอ้างอิง dq จะต้องมีชุดติดตามเฟส (Phase lock loop: PLL) ใช้งานร่วมด้วยดังภาพประกอบ 1.7



ภาพประกอบ 1.7 โครงสร้างการทำงานของดี-สแตตคอมสำหรับวิธีการควบคุม PWM

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษารักษาแรงดันไฟฟ้าที่โหลดด้วยดี-สแตตคอม โดยใช้กลวิธีของการพิจารณาแบบจำลองของอุปกรณ์ดี-สแตตคอมบนกรอบอ้างอิง abc โดยแบบจำลองที่ได้จะถูกนำไปใช้สำหรับการออกแบบชุดควบคุมกระแส ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยที่ชุดควบคุมกระแสใช้หลักการควบคุมแบบฮีสเทอรีซิส (Hysteresis control) ทำให้การออกแบบระบบควบคุมมีความสะดวกและสามารถลดชุดควบคุมแบบ PI ในส่วนของการควบคุมกระแสที่ลู่ใน และสามารถลดชุดติดตามเฟสลงได้เนื่องจากไม่ได้ทำการแปลงสัญญาณจากกรอบ abc ไปอยู่ในกรอบ dq เป็นผลให้การออกแบบระบบควบคุมลดความซับซ้อน ในส่วนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI ใช้วิธีการค่าเหมาะสมที่จุดสมมูล (Symmetrical optimum) ในขณะที่การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัสจะใช้หลักการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีจินติก

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม

1.2.2 เพื่อปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ดี-สแตตคอม

1.2.3 เพื่อศึกษาและออกแบบการควบคุมแบบ PI ของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัสด้วยวิธีการจินติก (Genetic Algorithm)

1.2.4 เพื่อประยุกต์การใช้งานของดี-สแตตคอมที่ใช้รักษาแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นบนโปรแกรม MATLAB/Simulink



1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 สร้างแบบจำลองการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ดี-สแตตคอม บนโปรแกรม MATLAB/Simulink

1.3.2 แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถรักษากระดับแรงดันไฟฟ้าภายในสภาวะการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันช่วงระยะสั้น ได้ตามมาตรฐาน IEEE std. 1159-1995

1.3.3 ระบบทดสอบเป็นระบบจำหน่าย 2 บัส ที่แรงดันพิกัด 22 kV

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1.4.1.1 สร้างแบบจำลองอุปกรณ์ดี-สแตตคอม ที่ใช้งานกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4.1.2 สร้างแบบจำลองระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4.1.3 ระบบทดสอบเป็นระบบจำหน่าย 2 บัส ที่แรงดันพิกัด 22 kV โดยทดสอบการใช้งานของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม เพื่อรักษากระดับตามมาตรฐาน IEEE std. 1159-1995 ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1.4.2.1 ศึกษาปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE std. 1159-1995

1.4.2.2 ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลของดี-สแตตคอม

1.4.2.3 ศึกษาหลักการทำงานของดี-สแตตคอม

1.4.2.4 ศึกษาหลักการทำงานของวิธีการจีเนติก

1.4.2.5 ออกแบบชุดควบคุม PI สำหรับดี-สแตตคอม

1.4.2.6 ออกแบบชุดควบคุม PI สำหรับดี-สแตตคอม

1.4.2.7 จำลองผลของระบบควบคุมในสภาวะแรงดันตก แรงดันเกิน

1.4.2.8 สรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เข้าใจในหลักการทำงานของอุปกรณ์ดี-สแตตคอมและวิธีการจีเนติก



- 1.5.2 ได้แบบจำลองของอุปกรณ์ดี-สแตดคอมที่สามารถใช้ปรับปรุงคุณภาพของกำลังไฟฟ้า
- 1.5.3 ได้แบบจำลองการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายด้วยดี-สแตดคอม
- 1.5.4 สามารถนำแบบจำลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า



บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

จากปัญหาของคุณภาพกำลังไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อการใช้ของผู้ใช้ไฟฟ้า เช่นแรงดันตกหรือแรงดันเกิน ที่เป็นปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่พบได้บ่อยในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า CPDs มาใช้เพื่อแก้ปัญหาของคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น CPDs สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือชนิดจัดโครงสร้างโครงข่ายใหม่ (Network reconfiguring type) ที่เน้นในการออกแบบระบบป้องกัน และชนิดที่เป็นการชดเชย (Compensating type) ในส่วนชนิดของการชดเชยนั้น ดี-สแตตคอมมีโครงสร้างในการใช้งานที่มีความสะดวก เนื่องจากเป็นการต่อขนานร่วมกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า จึงทำให้การปลดออกหรือเชื่อมต่อมีความคล่องตัวและสะดวกกว่า CPDs แบบอื่นๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งความสนใจไปที่อุปกรณ์ดี-สแตตคอม เพื่อที่จะใช้ในการรักษาระดับแรงดันที่โหลดบัส ดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไป

2.1 คุณภาพของกำลังไฟฟ้า (Power Quality)

ในหัวข้อนี้เป็นการกล่าวเกี่ยวกับคุณภาพกำลังไฟฟ้าและปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า ซึ่งนิยามของคุณภาพกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC และ IEEE หมายถึง ลักษณะของกระแส แรงดัน และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟในสภาวะปกติ ที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานที่ผิดพลาดหรือเสียหาย (IEEE std.1159-1995, 1995) คุณภาพกำลังไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อทั้งผู้ผลิตไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อผู้ใช้ไฟเพราะหากผู้ใช้ไฟได้รับกำลังไฟฟ้าที่ไม่มีคุณภาพเพียงพอ อาจทำให้เกิดความเสียหายร้ายแรงต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า และรวมไปถึงความสูญเสียทางการเงินเป็นจำนวนมาก หากผู้ใช้ไฟที่เชื่อมต่อกับบัสเดียวกันกับโหลดมอเตอร์ขนาดใหญ่ อาจได้รับผลกระทบจากแรงดันตก ซึ่งเกิดขึ้นทุกๆ ครั้งที่มีการเริ่มทำงานของมอเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ใช้ไฟที่มีความอ่อนไหวกับการเปลี่ยนแปลงแรงดัน เช่นโรงพยาบาล ศูนย์ควบคุมทางอากาศ และสถาบันการเงิน เป็นต้น ผู้ใช้ไฟฟ้าเหล่านี้ต้องการกำลังไฟฟ้าที่สะอาดและมีความต่อเนื่องในการจ่ายกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้ในหลายๆ กระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม เช่น โรงงานอุตสาหกรรมด้านสารกึ่งตัวนำ หรือโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร อาจได้รับความเสียหายจากแรงดันไฟฟ้าตกเพียงในช่วงเวลาสั้น ๆ ซึ่งความเสียหายนี้ทำให้ผู้ใช้ไฟต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก

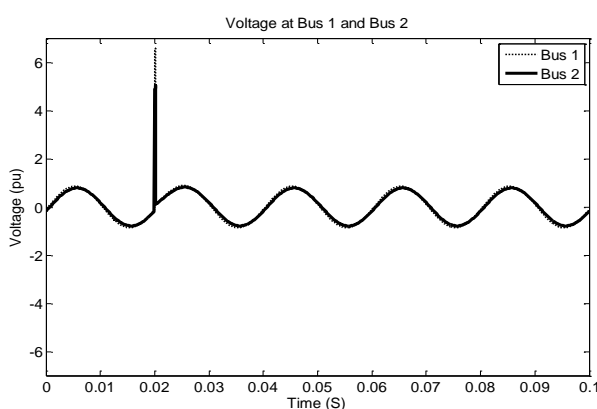
การเกิดปัญหาคุณภาพของกำลังไฟฟ้าที่พบนั้น สามารถจำแนกได้ 2 สาเหตุหลักได้แก่ สาเหตุที่หนึ่งคือสาเหตุอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ และสาเหตุเนื่องจากการกระทำของมนุษย์ ตัวอย่างสาเหตุของปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่เกิดเนื่องมาจากปรากฏการณ์ธรรมชาติเช่น การเกิด



ความผิดปกติในระบบ การเกิดฟ้าผ่าบนระบบสายส่งหรือสายป้อน ต้นไม้หรือกิ่งสัมผัสกับสายป้อน อุปกรณ์ในระบบจำหน่ายเกิดการดำเนินงานที่ผิดพลาดและเกิดการชำรุดของอุปกรณ์ทำงานเป็นต้น ในส่วนของสาเหตุที่สองที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของมนุษย์เช่น การปลดหรือต่ออุปกรณ์เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าไฟฟ้า ตัวเก็บประจุ สายป้อนออกหรือเข้ากับระบบ การสวิตช์เปิด-ปิดโหลดขนาดใหญ่ การต่อลงดินในระบบไม่ถูกต้อง และโหลดที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเช่น ชุดขับเคลื่อนเพื่อปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ (Adjustable speed driver: ADS) เป็นต้น คุณภาพกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐานของ IEEE std.1159-1995, 1995 สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 สภาวะชั่วครู่ (Transients) คือปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของสภาพไฟฟ้า อาจจะเป็นแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าในเวลาสั้นที่ทันใจจากสภาพปกติ สภาวะชั่วครู่สามารถจำแนกออกได้ 2 ประเภทได้แก่อิมพัลส์ชั่วครู่ (Impulsive transient) และการแกว่งชั่วครู่ (Oscillatory transient)

ในส่วนของอิมพัลส์ชั่วครู่ หมายถึง ขนาดกระแสและแรงดันที่มีค่าความชันสูงมาก เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแต่อย่างใด ชั่วของอิมพัลส์ชั่วครู่จะมีชั่วเดียวซึ่งอาจเป็นได้ทั้งบวกและลบ อิมพัลส์ชั่วครู่ นั้นจะมีช่วงเวลาเพิ่มระดับ (Rise time) และช่วงเวลาลดระดับ (Decaying time) ที่เร็วมาก โดยส่วนใหญ่อิมพัลส์ชั่วครู่เกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและการตัดต่อ (Switching) ผลกระทบของอิมพัลส์ชั่วครู่ จะทำให้อุปกรณ์ในระบบได้รับความเสียหายจากแรงดันไฟฟ้าเกิน โดยปกติแล้วผลของปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าแบบนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อส่วนอื่นๆ ของระบบที่อยู่ห่างไกลจากจุดที่เกิดขึ้นมากนัก ระยะทางของการเคลื่อนที่ของอิมพัลส์ชั่วครู่ นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบ ลักษณะของอิมพัลส์ชั่วครู่แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.1

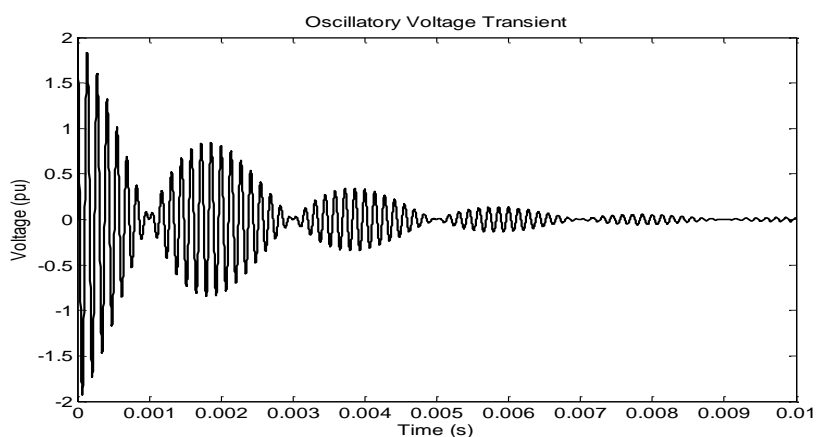


ภาพประกอบ 2.1 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเกิดอิมพัลส์ชั่วครู่เกิดโดยฟ้าผ่า



สภาวะการแกว่งชั่วคราวหมายถึงลักษณะของแรงดันหรือกระแสที่มีค่าสูง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ โดยทั่วไปแล้วจะมีลักษณะเป็นสองชั่ว และอาจจะมีส่วนประกอบของรูปคลื่นไซน์ 1 ไซเคิลหรือมากกว่าก็ได้ ซึ่งขนาดค่ายอดของรูปคลื่นจะลดลงเรื่อยๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.2 ผลกระทบของการแกว่งชั่วคราวทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าได้รับความเสียหาย และฉนวนของอุปกรณ์จะเสื่อมสภาพหรือมีการสูญเสียความเป็นฉนวนเร็วขึ้น การแกว่งชั่วคราวสามารถจำแนกตามลักษณะของความถี่ที่แกว่งได้ดังนี้

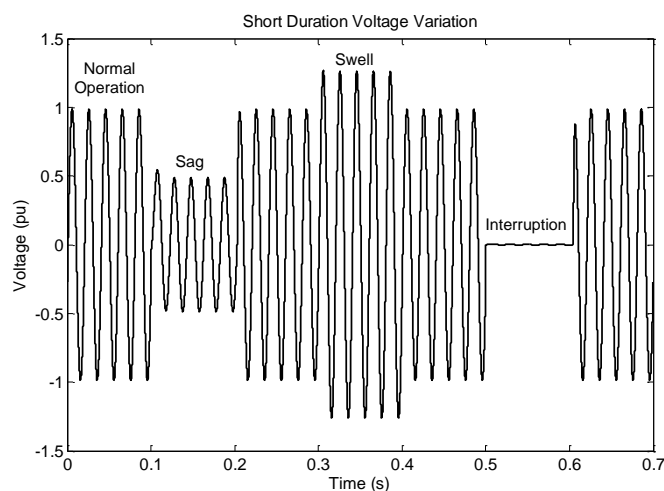
1. High frequency transient มีความถี่การแกว่งมากกว่า 500 kHz
2. Medium frequency transient มีความถี่การแกว่งอยู่ระหว่าง $5 - 500 \text{ kHz}$
3. Low frequency transient มีความถี่การแกว่งน้อยกว่า 5 kHz



ภาพประกอบ 2.2 ผลของสภาวะการแกว่งชั่วคราว

2.1.2 การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงสั้น (Short duration voltage variation) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลง 0.5 s ถึง 1 min ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนแปลงนี้จะมีสาเหตุเกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะความผิดปกติ การตัดต่อของโหลดขนาดใหญ่ที่ต้องการกระแสจำนวนมาก และการเชื่อมต่อของสายป้อนที่หลวม เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันช่วงระยะสั้นสามารถจำแนกออกเป็น แรงดันตกช่วงสั้น (Voltage sag) แรงดันเกินช่วงสั้น (Voltage swell) และไฟฟ้าดับช่วงสั้น (Voltage interruption) ซึ่งลักษณะทั้ง 3 ชนิดนี้แสดงไว้ในภาพประกอบ 2.3





ภาพประกอบ 2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันช่วงระยะสั้น

แรงดันตกช่วงสั้นหมายถึง ค่าของแรงดัน ที่ความถี่กำลังไฟฟ้าปกติมีขนาดลดลงระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 p.u. ในช่วงเวลาระหว่าง 10 ms ถึง 1 min แรงดันตกช่วงสั้นนี้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า นอกจากนี้การต่อโหลดขนาดใหญ่เข้าระบบอาจก่อให้เกิดแรงดันตกช่วงสั้นได้เช่นเดียวกัน ผลกระทบเนื่องจากแรงดันตกช่วงสั้นนี้ จะทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า มีการทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงาน

แรงดันเกินช่วงสั้นหมายถึง ค่าของแรงดันที่ความถี่กำลังไฟฟ้าปกติมีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1 ถึง 1.8 p.u. ในช่วงเวลาระหว่าง 10 ms ถึง 1 min สาเหตุการเกิดแรงดันเกินช่วงสั้นนั้น อาจเกิดจากแรงดันไฟฟ้าของเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดปกติ ในระหว่างการเกิดความผิดปกติแบบเฟสเดียวลงดินขึ้นในระบบไฟฟ้า

ไฟฟ้าดับช่วงสั้นหมายถึง ค่าของแรงดันมีค่าลดลงต่ำกว่า 0.1 p.u. ในช่วงเวลาระหว่าง 10 ms ถึง 1 min ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะความผิดปกติทางไฟฟ้าในระบบ อุปกรณ์ทำงานล้มเหลว และการควบคุมเกิดความผิดพลาด เป็นต้น

ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าช่วงสั้นทั้ง 3 ลักษณะนั้น เมื่อแบ่งตามช่วงระยะเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะดังนี้ แบบทันทีทันใด (Instantaneous) แบบชั่วขณะ (Momentary) และแบบชั่วคราว (Temporary) ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงสั้น

เวลาเปลี่ยนแปลงช่วงสั้น (Short duration)	ระยะเวลาการเกิด (Typical duration)	ขนาดแรงดัน (Voltage magnitude)
---	---------------------------------------	-----------------------------------



แบบทันทีทันใด (Instantaneous)	Sag	0.5-30 คาบ	(10 ms - 1 s)	0.1-0.9 p.u.
	Swell	0.5-30 คาบ	(10 ms - 1 s)	1.1-1.8 p.u.
แบบชั่วขณะ (Momentary)	Interruption	0.5-3 s	(10 ms - 3 s)	<0.1 p.u.
	Sag	30 cycles-3 s	(1 - 3 s)	0.1-0.9 p.u.
	Swell	30 cycles-3 s	(1 - 3 s)	1.14-1.4 p.u.
แบบชั่วคราว (Temporary)	Interruption	3 s- 1 min	(3 s -1 min)	<0.1 p.u.
	Sag	3 s- 1 min	(3 s -1 min)	0.1-0.9 p.u.

2.1.3 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าช่วงยาว (Long duration voltage variation) คือการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่และกำลังไฟฟ้าปกติ โดยมีระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงเกินกว่า 1 min ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงการทำงานของโหลดขนาดใหญ่ การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้สามารถจำแนกออกได้เป็นแรงดันต่ำ (Under voltage) แรงดันเกิน (Over voltage) และไฟฟ้าขัดข้อง (Sustained interruption)

การเปลี่ยนแปลงในลักษณะแรงดันต่ำคือค่าแรงดันมีขนาดลดลงระหว่าง 0.8 ถึง 0.9 p.u. ในช่วงเวลานานกว่า 1 min มีสาเหตุจากผลของการต่อโหลดขนาดใหญ่เข้าระบบ หรือมีการปลดตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ออกจากระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่ไม่มีการป้องกันหรือระบบที่รักษาระดับแรงดันได้ยาก ผลกระทบของแรงดันตกนี้ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าได้รับความเสียหาย

ในส่วนของแรงดันเกินคือค่าแรงดันมีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1 p.u. ถึง 1.2 p.u. ในช่วงเวลานานกว่า 1 min มีสาเหตุเกิดขึ้นเนื่องจากผลของการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือมีการต่อตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เข้าสู่ระบบ ผลกระทบเนื่องจากแรงดันเกินนี้ทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเกิน

และในส่วนของไฟฟ้าขัดข้องนั้นหมายถึงค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงเป็น 0 p.u. ในช่วงเวลานานกว่า 1 min ซึ่งมีสาเหตุเกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะความผิดปกติของไฟฟ้าในระบบ ทำให้อุปกรณ์ป้องกันมีการตัดวงจรแหล่งจ่ายไฟออกถาวร ผลกระทบทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าหยุดการทำงาน การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงยาวทั้ง 3 แบบนั้นสามารถสรุปได้ดังตาราง 2.2

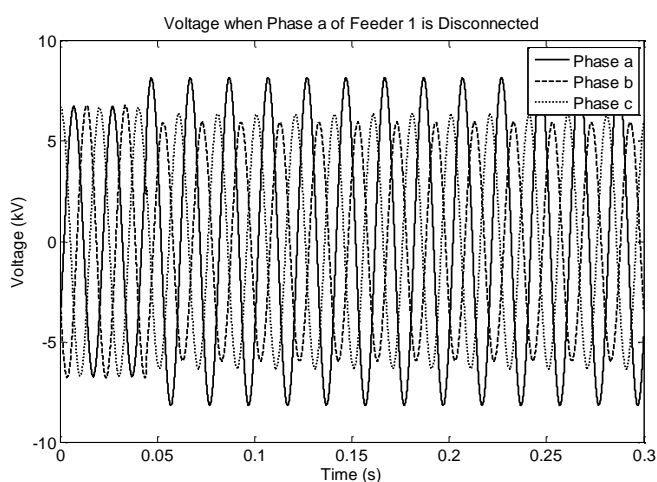
ตาราง 2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงยาว

Type	Magnitude	Duration
Interruption, Sustained	0.0 p.u.	>1 min
Under voltage	0.8-0.9 p.u.	>1 min



Ovder voltage	1.1-1.2 p.u.	>1 min
---------------	--------------	--------

2.1.4 แรงดันไม่สมดุล (Voltage unbalance) แรงดันไม่สมดุล คือสภาวะแรงดัน 3 เฟสที่มีขนาดของแรงดันในแต่ละเฟสแตกต่างกัน (0.5 ถึง 2%) และรวมไปถึงมุมเฟสเปลี่ยนไปจาก 120 องศาสาเหตุอันดับแรก ๆ ที่ก่อให้เกิดแรงดันไม่สมดุล คือความไม่สมดุลของโหลดในแต่ละเฟส นอกจากนี้การเปิดวงจรของเฟสใดเฟสหนึ่งในระบบ 3 เฟส สามารถส่งผลให้เกิดแรงดันไม่สมดุลได้เช่นกันดังแสดงไว้ในภาพประกอบ 2.4 จากรูปพบว่าเกิดแรงดันเกินในเฟส a อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เฟส b และ c นั้นจะเกิดแรงดันต่ำ ผลกระทบของแรงดันไม่สมดุลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเช่น มอเตอร์ไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานสั้นลงเนื่องจากผลของความร้อนที่เกิดขึ้น



ภาพประกอบ 2.4 แรงดันไม่สมดุล

2.1.5 ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น คือการเบี่ยงเบนในสภาวะคงตัวของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าไปจากรูปคลื่นไซน์ (Sine wave) ซึ่งความผิดเพี้ยนนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ชนิด คือการผิดเพี้ยนเนื่องจากองค์ประกอบไฟตรง (DC offset) ฮาร์มอนิก (Harmonic) และคลื่นรอยบาก (Notching)

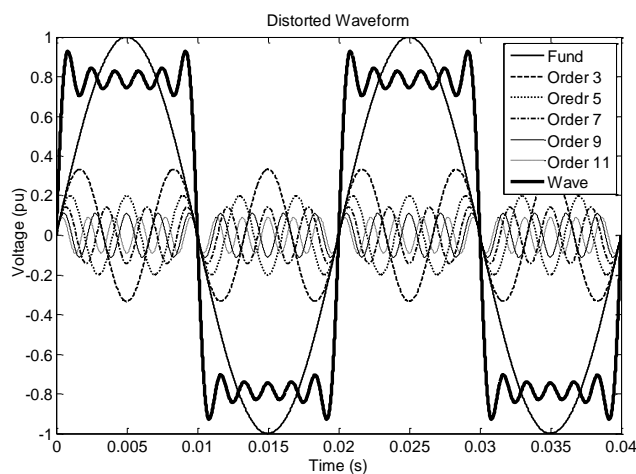
องค์ประกอบไฟตรงหมายถึง การที่มีกระแสหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ปนอยู่ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสาเหตุหลักเกิดจากผลของการใช้อุปกรณ์เรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-wave rectification) ส่งผลทำให้เกิดความร้อนและค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า และอาจทำให้เกิดการผูกרוןของแท่งหลักดินได้

ฮาร์มอนิกนั้นหมายถึง ส่วนประกอบในสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใด ๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental frequency) เช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 มีความถี่เป็น 150 Hz ผลของฮาร์มอนิกเมื่อรวมกันกับสัญญาณความถี่หลักมูล ด้วยทาง

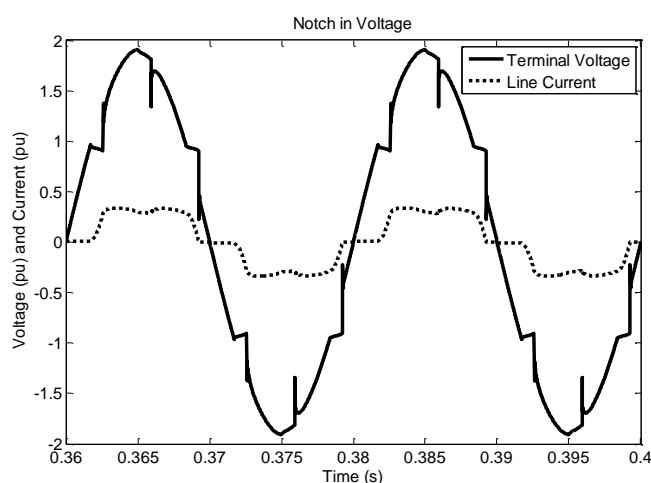


ขนาดและมุมเฟสทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดเปลี่ยนไป และมีรูปสัญญาณเปลี่ยนไปจากสัญญาณคลื่นไซน์

ในส่วนของคลื่นรบกวนนั้น คือสิ่งรบกวนทางแรงดันไฟฟ้าในลักษณะคล้ายกับฮาร์โมนิก และสภาวะชั่วคราวที่มีลักษณะต่อเนื่อง ซึ่งคลื่นรบกวนเกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ในช่วงการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง คลื่นรบกวนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลัง แสดงไว้ในภาพประกอบ 2.5 ซึ่งจากภาพประกอบ 2.5 เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในเฟสเดียวกัน ผลกระทบของคลื่นรบกวนนั้นทำให้อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์มีการทำงานผิดพลาด



ภาพประกอบ 2.5 รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยน



ภาพประกอบ 2.6 คลื่นรบกวนที่เกิดขึ้นจากการทำงานของคอนเวอร์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



2.1.6 แรงดันกระเพื่อม (Voltage fluctuation) คือการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าแรงดัน มีขนาดการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.95 p.u. ถึง 1.05 p.u. โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่และไม่แน่นอน ซึ่งเป็นผลเกิดจากการใช้อุปกรณ์ประเภทเตาหลอมแบบอาร์ก ทำให้เกิดไฟกระพริบ (Flicker) ที่หลอดไฟ และอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันมากเกินไป

จากปัญหาทางคุณภาพกำลังไฟฟ้าตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ที่ใช้ไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย จึงได้นำอุปกรณ์ CPDs มาต่อร่วมเข้าไปในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้างดรายละเอียดต่อไป

2.2 อุปกรณ์คัสตอมเพาเวอร์ (Custom Power Devices: CPDs)

เทคโนโลยีของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้หรือ FACTs ได้เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบส่งจ่าย เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวในการแก้ปัญหาการแกว่งของแรงดันทำให้โหลดมีความปลอดภัย เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าในทำนองเดียวกันนั้นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้ถูกนำมาใช้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วย ทั้งนี้เพื่อคุณภาพและความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า เรียกอุปกรณ์นั้นว่า อุปกรณ์คัสตอมเพาเวอร์ (CPDs) โดยแนวความคิดของ CPDs ได้ถูกเริ่มนำมาใช้ (Gygui, 1994; Hingorani and Gygyi, 1995) เพื่อแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าให้กับระบบจำหน่ายที่ใช้ในพื้นที่นั้นๆ ได้ลดปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าลงได้ CPDs ได้รวมวิธีการแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายดังที่เสนอไว้ ตลอดจนเทคโนโลยีที่ลดปัญหาด้านไฟดับพร้อมทั้งปรับปรุงให้ดีขึ้น

อุปกรณ์ CPDs มีโครงสร้างพื้นฐาน 2 ชนิด คือชนิดจัดโครงสร้างโครงข่ายใหม่ และชนิดการชดเชย มีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ชนิดจัดโครงสร้างโครงข่ายใหม่ (Network reconfiguring type)

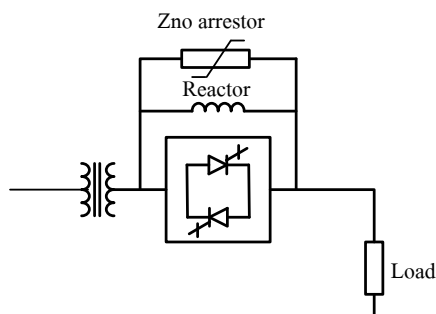
โดยในส่วนของชนิดจัดโครงสร้างโครงข่ายใหม่นั้น อาจใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเช่น GTO หรือไทรสเตอร์เป็นส่วนประกอบ โดยปกติแล้วจะใช้ CPDs ชนิดนี้ใช้เป็นตัวจำกัดกระแสที่ผิดพ่วงและใช้เป็นตัวหยุดกระแสระหว่างการเกิดความผิดพ่วงของแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถถ่ายโอนโหลดไปยังสายป้อนอื่นที่ไม่มีปัญหาได้อย่างรวดเร็ว อุปกรณ์ CPDs ที่จัดอยู่ในประเภทนี้ เช่น

2.2.1.1 อุปกรณ์จำกัดกระแสโซลิดสเตต (Solid state current limiter : SSCL)

SSCL เป็นอุปกรณ์ที่ต่ออนุกรมกับสายป้อนดังแสดงในภาพประกอบ 2.7 ที่สามารถจำกัดกระแสผิดพ่วงในสายป้อนได้ โดยการปรับอินดักแตนซ์ของสายเพิ่มขึ้น เมื่อตรวจพบความผิด



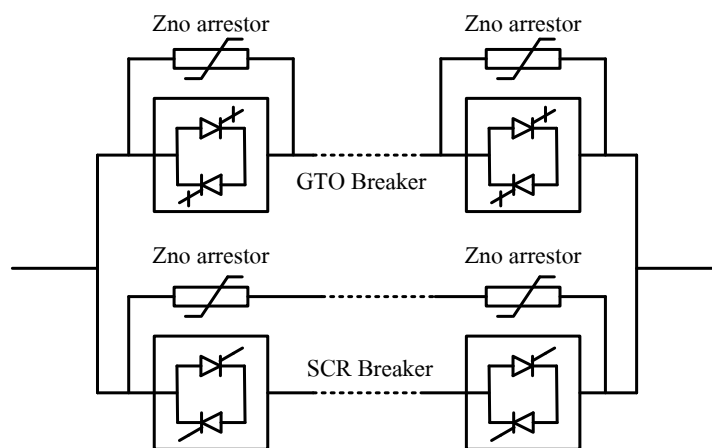
พ่วงในระบบ ในขณะที่ความผิดพลาดนี้ถูกปลดออกไปแล้ว อุปกรณ์ SSCL จะทำหน้าที่ลดค่าอินดักแตนซ์ของสายป้อนมาอยู่ในระดับที่เป็นค่าปกติ



ภาพประกอบ 2.7 โครงสร้างของอุปกรณ์ SSCL

2.2.1.2 โซลิดสเตตเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Solid state circuit breaker: SSCB)

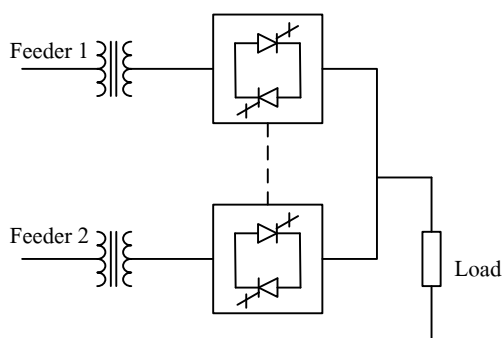
SSCB นี้สามารถขัดจังหวะการเกิดความผิดพลาด (Interrupt fault) ได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อความผิดพลาดถูกปลดออกไป อุปกรณ์ SSCB ยังสามารถต่อระบบให้ทำงานตามปกติได้โดยอัตโนมัติ โครงสร้างของ SSCB แสดงไว้ในภาพประกอบ 2.8



ภาพประกอบ 2.8 โครงสร้างของอุปกรณ์ SSCB

2.2.1.3 สวิตช์ถ่ายโอนโซลิดสเตต (Solid state transfer switch: SSTS)

SSTS ถูกใช้เพื่อป้องกันโหลดความไวสูง (Sensitive load) จากการเกิดแรงดันตกหรือแรงดันเกินช่วงสั้น ซึ่งอุปกรณ์ SSTS นี้ สามารถถ่ายโอนโหลดความไวสูง (Transfer sensitive load) จากสายป้อนแหล่งจ่ายหนึ่งไปยังสายป้อนอื่นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อตรวจพบแรงดันตกหรือแรงดันเกินช่วงสั้นที่สายป้อนของแหล่งจ่ายนั้นๆ โครงสร้างของ SSTS แสดงไว้ดังภาพประกอบ 2.9



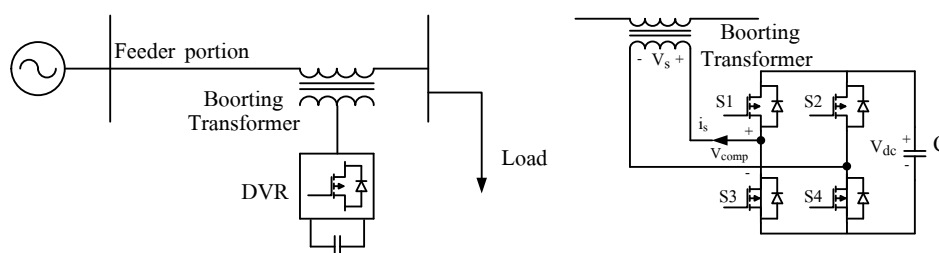
ภาพประกอบ 2.9 โครงสร้างของอุปกรณ์ SSTS

2.2.2 CPDs ที่เป็นชนิดการชดเชย (Compensating type)

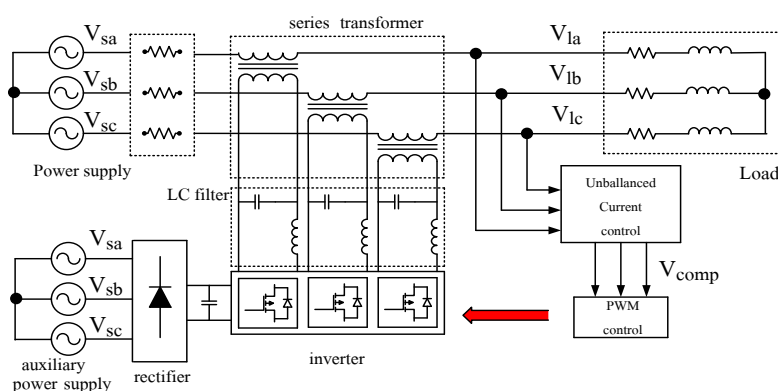
CPDs ที่เป็นชนิดชดเชยสามารถใช้ทำหน้าที่เป็นได้ทั้งการกรองแบบแอคทีฟ (Active filtering) การปรับสมดุลให้โหลด การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor correction) และการรักษาระดับแรงดัน ในกรณีของการกรองแบบแอคทีฟจะทำหน้าที่กำจัดกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งสามารถต่อได้ทั้งอนุกรมและขนานกับระบบ อย่างไรก็ตามการต่อแบบขนานจะได้รับความนิยมมากกว่า ต่อแบบอนุกรม เนื่องจากมีความสะดวกในการป้องกันมากกว่า CPDs แบบชดเชยบางชนิดจะถูกใช้สำหรับเป็นตัวชดเชยให้กับโหลด ซึ่งการทำงานในโหมดนี้จะทำหน้าที่รักษากระแสของโหลดให้เป็นรูปคลื่นไซน์ที่สมดุล ในขณะที่อุปกรณ์ชดเชยอื่นๆ นั้นจะทำหน้าที่จ่ายแรงดันที่ปราศจากฮาร์มอนิกให้กับโหลด อุปกรณ์ CPDs ที่จัดอยู่ในประเภทของการชดเชยเช่น

2.2.2.1 ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต (Dynamic voltage restorer: DVR)

DVR เป็นอุปกรณ์ชดเชยที่ทำการต่ออนุกรมเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะประกอบไปด้วยวงจรแปลงผัน ตัวเก็บประจุเชื่อมโยง DVR จะสร้างแรงดันไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่อเชื่อมโยง แบบอนุกรมกับสายป้อนของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อทำการชดเชยแรงดันไฟฟ้าในระบบได้ทั้งสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว จากภาพประกอบ 2.10 นำเสนอโครงสร้างแบบเฟสเดียวของ DVR และภาพประกอบ 2.11 แสดงโครงสร้างของ DVR เมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า



ภาพประกอบ 2.10 โครงสร้างวงจรไฟฟ้าเฟสเดียวของ DVR



ภาพประกอบ 2.11 โครงสร้างของ DVR เมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

จากภาพประกอบ 2.11 โครงสร้างของ DVR จะประกอบไปด้วย

1. วงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดัน จะแปลงแรงดันกระแสตรงจากอินพุตที่ได้จากตัวเก็บประจุเชื่อมโยงกระแสตรง แปลงสัญญาณเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายให้กับวงจรกรองฮาร์มอนิกและแรงดันระลอก (LC-filter) วงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดันจะเป็นแบบเฟสเดียว 3 ชุด ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส โดยในแต่ละชุดประกอบด้วย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเช่น IGBT เป็นต้น ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อวงจร จำนวน 3 ชุด ชุดละ 4 ตัวการควบคุม และการทำงานของวงจรแปลงผันเป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดัน และแต่ละชุดทำงานเป็นอิสระต่อกัน

2. แหล่งจ่ายกำลังงานของ DVR นั้นต้องการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟในการฟื้นฟูแรงดัน ซึ่ง DVR จะสามารถจ่ายพลังงานโดยใช้พลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุ ที่มีขนาดเหมาะสมหรือใช้แหล่งจ่ายช่วยที่ถูกติดตั้งเสริมขึ้นมา เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดัน ข้อดีของ DVR คือมีแหล่งจ่ายกำลังงานภายนอกที่เก็บหรือสะสมพลังงานเอาไว้ และเตรียมพร้อมตลอดเวลาสำหรับการทำงาน ทำให้ DVR สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดปลายทางที่ต่ออยู่ ได้เมื่อในระบบเกิดความผิดปกติต่างๆ แล้วทำให้เกิดไฟดับแต่โหลดยังสามารถทำงานต่อไปได้

3. หม้อแปลงไฟฟ้าอนุกรม สำหรับแบบแผนของหม้อแปลงไฟฟ้าอนุกรม แรงดันที่จ่ายมากที่สุดหาได้จากแรงดันเชื่อมโยงกระแสตรง โดยโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าอนุกรม จะต่อแบบขนานกับสวิตช์หรืออินเวอร์เตอร์ การใช้งานจะเน้นที่ขนาดพอเหมาะสมกับโหลดและมีกำลังงานสูญเสีย น้อย

4. วงจรกรอง ใช้สำหรับกรองฮาร์มอนิกและแรงดันระลอกที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ แล้วผ่านสู่หม้อแปลงไฟฟ้าอนุกรม รูปแบบของวงจรกรองใน DVR นั้นจะเป็นชนิดติดตั้งที่สายหรือติดตั้ง

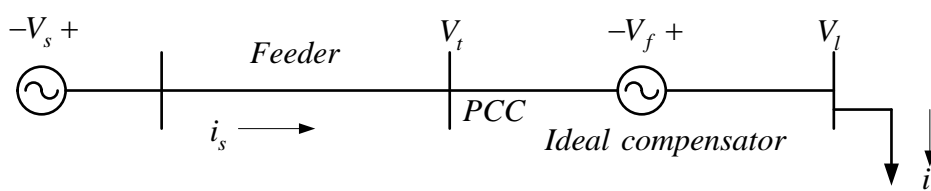


ในอินเวอร์เตอร์ก็ได้ ทั้งนี้การสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกซึ่งจะต้องทำการกรองออกก่อนที่จะจ่ายให้กับโหลด

5. ชุดควบคุม จะประกอบด้วยชุดตรวจวัดแรงดันที่ปลายสาย เพื่อวิเคราะห์ถึงสถานะแรงดันของโหลดในแต่ละเฟส และชุดควบคุมการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในอินเวอร์เตอร์ โดยการใช้การควบคุมแบบ PWM

DVR นั้นสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ทั้งแบบ 3 เฟสสมดุลและไม่สมดุล อนุกรมเข้ากับสายป้อน ดังนั้นโครงสร้างและระบบควบคุมจึงมีความแตกต่างกัน DVR มีโครงสร้างรูปแบบที่ต่างกัน โดยรูปหนึ่งสามารถจ่ายหรือดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจริงกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับในสถานะคงตัวได้ ซึ่งรูปแบบนี้จะต้องทำการติดตั้งแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงด้านอินพุตให้กับ DVR ส่วนอีกรูปหนึ่งไม่สามารถจ่ายหรือดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจริงในสถานะคงตัวได้ ซึ่งรูปแบบนี้จะทำการติดตั้งตัวเก็บประจุกระแสตรงสำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตให้กับ DVR อย่างไรก็ตาม รูปแบบนี้สามารถจ่ายและดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจริงในเวลาสั้นๆได้ หลักการทำงานทั่วไปของ DVR สามารถพิจารณาไดอะแกรมของระบบที่เชื่อมต่อกับ DVR ดังแสดงในภาพประกอบ 2.12 จากภาพ DVR ถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันแบบอุดมคติที่สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าอนุกรมเข้ากับระบบ v_f โดยมีทิศทางดังแสดงในภาพประกอบ 2.19 สามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าที่โหลดได้ดังสมการ (2.1)

$$v_l = v_t + v_f \quad (2.1)$$



ภาพประกอบ 2.12 ไดอะแกรมของระบบที่เชื่อมต่อกับ DVR

สำหรับการใช้งานของ DVR นั้นได้เสนอการศึกษาเกี่ยวกับการใช้งาน DVR ไว้หลายบทความด้วยกัน เช่น (Pudi *et al.*, 2012) ได้นำเสนอการศึกษาจำลองและการวิเคราะห์อุปกรณ์ DVR โดยจำลองการทำงานบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และใช้การจำลองอุปกรณ์ในการสวิตช์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ทำงานร่วมกับ PSCAD/EMTDC ซึ่งทำการศึกษารองการทำงานของอุปกรณ์ DVR เพื่อป้องกันโหลดจากการเกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟสสมดุลทางด้าน

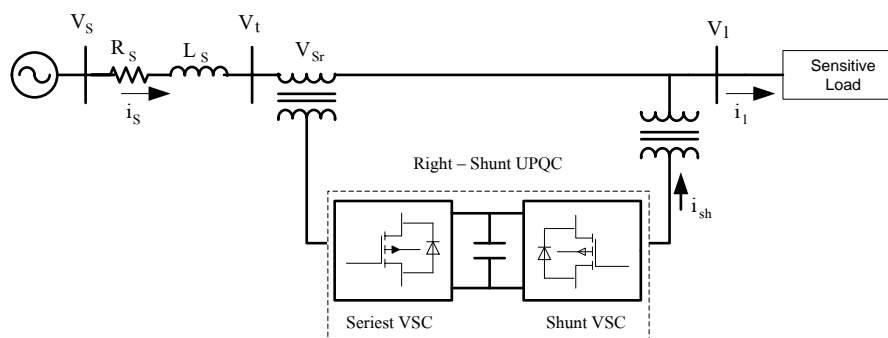


แหล่งจ่าย ส่งผลให้เกิดแรงดันตกช่วงสั้น 30% ของแรงดันพิกัด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ DVR ทำให้สามารถรักษาระดับแรงดันที่โหลดไว้ที่ 98% ของแรงดันพิกัดได้อย่างรวดเร็ว

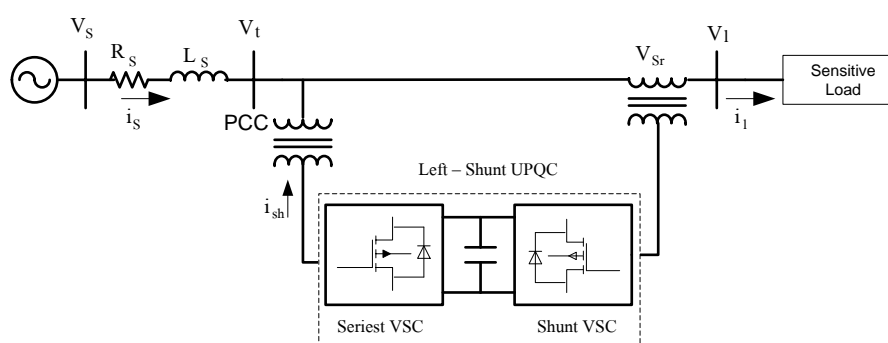
2.2.2.2 ตัวปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าแบบรวม (Unified Power Quality Conditioner: UPQC)

UPQC ประกอบด้วยอุปกรณ์แปลงผันแหล่งจ่ายแรงดัน 2 ชนิด ซึ่งวงจรแปลงผันทั้ง 2 ชนิดนี้จะเชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุเชื่อมโยงกระแสตรงร่วมกัน โดยที่วงจรแปลงผันตัวหนึ่งจะต่ออนุกรมกับสายป้อนผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าอนุกรม ในขณะที่วงจรแปลงผันที่เหลือจะต่อขนานเข้ากับสายป้อนเดียวกันผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าขนาน UPQC มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อชดเชยการกระเพื่อมและการไม่สมดุลของแรงดัน การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ การชดเชยกระแสลำดับลบ (Negative-sequence current) และการชดเชยฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย (Fujita and Akagi, 1996) โครงสร้าง UPQC สามารถเชื่อมกันได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบวงจรแปลงผันด้านขวา (Right-shunt UPQC) และแบบวงจรแปลงผันด้านซ้าย (Left-shunt UPQC) โครงสร้างพื้นฐานของ UPQC ทั้งสองแบบแสดงดังภาพประกอบ 2.13 (ก) และ (ข) ซึ่งสอดคล้องกับวงจรสมมูลในภาพประกอบ 2.14 (ก) และ (ข) ตามลำดับจากการที่ UPQC ทั้งสองแบบมีลักษณะวงจรที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ UPQC ทั้งสองแบบนี้มีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของทั้งสองแบบสามารถสรุปได้ว่า UPQC แบบวงจรขนานด้านขวาสามารถทำงานในโหมดการจ่ายและดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจริงเป็นศูนย์ได้ ในขณะที่ UPQC แบบวงจรแปลงผันขนานด้านซ้ายไม่สามารถทำงานในโหมดนี้ได้ นอกจากนี้ UPQC แบบวงจรแปลงผันขนานด้านขวา ยังสามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของโหลดมีค่าใกล้เคียง 1 ได้ ในขณะที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของโหลดเชื่อมต่อ UPQC แบบวงจรแปลงผันกำลังขนานด้านซ้ายจะขึ้นอยู่กับชนิดของโหลด ยิ่งไปกว่านั้นวงจรแปลงผันแบบขนานของ UPQC แบบวงจรแปลงผันขนานด้านขวา ยังสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟตามความต้องการของโหลดทั้งหมด ในขณะที่แบบวงจรแปลงผันขนานด้านซ้าย สามารถจ่ายได้เฉพาะค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดเท่านั้น ดังนั้นจากลักษณะเฉพาะที่กล่าวมานี้ UPQC แบบวงจรแปลงผันขนานด้านขวาจะโดดเด่นกว่า UPQC แบบวงจรแปลงผันขนานด้านซ้าย (Ghosh and Ledwich, 2002)



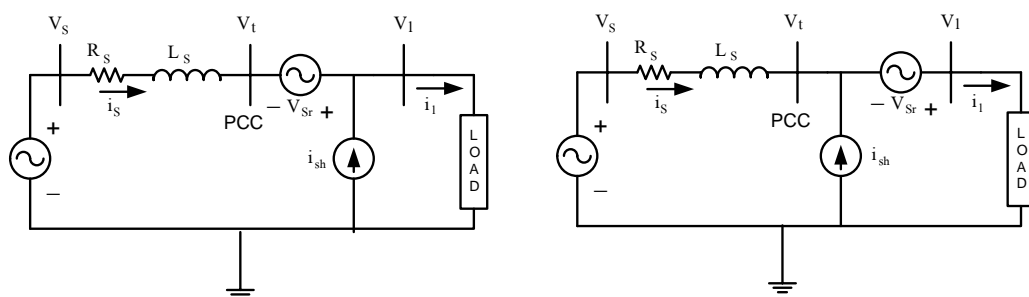


(ก) โครงสร้าง UPQC ด้านขวา



โครงสร้าง UPQC ด้านซ้าย

ภาพประกอบ 2.13 โครงสร้างของ UPQC ทางด้านขวาและด้านซ้าย



(ก) วงจรสมมูลของ UPQC ทางด้านซ้าย

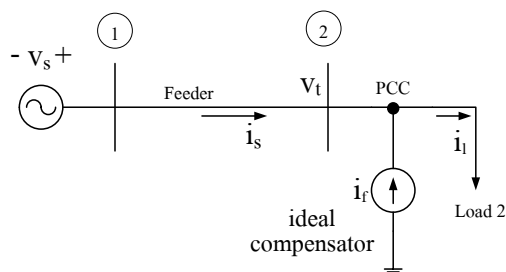
(ข) วงจรสมมูลของ UPQC ทางด้านขวา

ภาพประกอบ 2.14 วงจรสมมูลของ UPQC ทางด้านขวาและด้านซ้าย

2.2.2.3 ดี-สแตตคอม (D-STATCOM)

ดี-สแตตคอมเป็นอุปกรณ์ที่ต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ดี-สแตตคอมจะทำงานในลักษณะสร้างแรงดันเอาต์พุตแบบ 3 เฟสสมดุลและไม่สมดุลขนานเข้ากับระบบ ในกรณีที่ดี-

สแตตคอมทำหน้าที่เป็นตัวชดเชยให้กับโหลด จะแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติ i_f ต่อขนานเข้ากับโหลดบัสดังแสดงในภาพประกอบ 2.13



ภาพประกอบ 2.15 โครงสร้างดี-สแตตคอมเมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

จากภาพประกอบ 2.15 กำหนดให้โหลดเป็นรีแอกทีฟโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นและไม่สมดุล เมื่อติดตั้งดี-สแตตคอม กระแส i_s ที่ไหลผ่านสายป้อน จะมีลักษณะไม่สมดุลและผิดเพี้ยนตามกระแสของโหลด ส่งผลให้แรงดันที่บัสเกิดการผิดเพี้ยนและไม่สมดุลด้วย เพื่อลดปัญหานี้ดี-สแตตคอมจะฉีดกระแสเข้าไปในระบบเพื่อทำการชดเชยให้กระแส i_s กลับมาเป็นค่ากระแสมูลฐานและเป็นลำดับบวกตามเดิมนอกจากนี้ดี-สแตตคอมยังสามารถบังคับให้กระแส i_s มีเฟสตรงกันกับแรงดันที่บัส 2 ดังนั้นการเชื่อมต่อลักษณะนี้ดี-สแตตคอมจะทำหน้าที่ชดเชยกระแสให้กับโหลด และยังสามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้มีค่าเข้าใกล้ 1 ได้อีกด้วย

ดี-สแตตคอมนั้นเป็นอุปกรณ์ที่ต่อขนานเข้ากับระบบ ทำให้มีการเชื่อมโยง 2 ทิศทาง โดยเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ หรือคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ ที่ได้จากระดับของการประจุแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้กับตัวเก็บประจุ (Pudi *et al.*, 2012) ดี-สแตตคอมถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ชดเชยให้กับโหลดเช่น การปรับปรุงตัวประกอบไฟฟ้า การกรองฮาร์มอนิก และการปรับสมดุลโหลดเป็นต้น นอกจากนี้ดี-สแตตคอมยังสามารถรักษาระดับแรงดันที่บัสเชื่อมโยงได้อีกด้วย

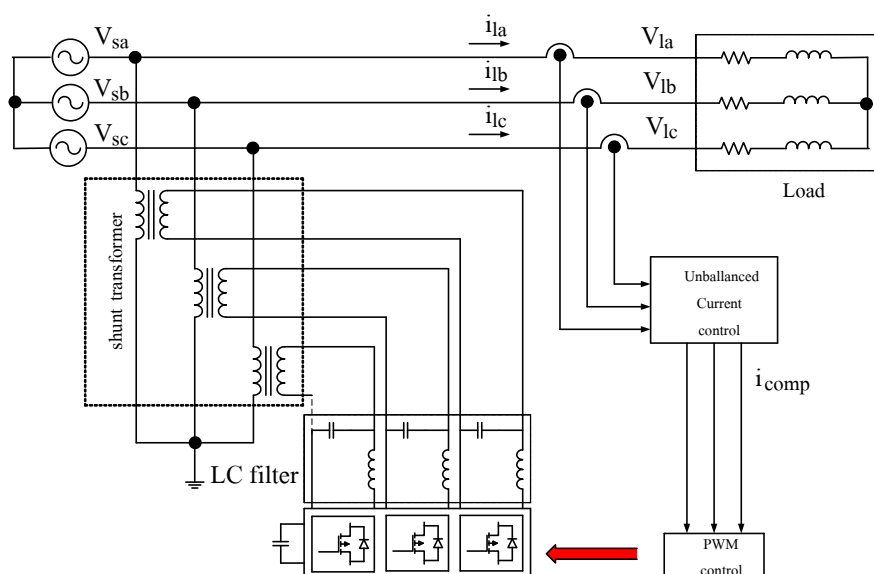
จากโครงสร้างและหลักการทำงานของดี-สแตตคอม DVR แล UPQC ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า และจากปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ดี-สแตตคอมเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าได้หลายปัญหา เช่นการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า การกรองฮาร์มอนิก และการปรับสมดุลโหลด เป็นต้น นอกจากนี้ดี-สแตตคอมยังสามารถรักษาระดับแรงดันที่โหลดบัสได้อีกด้วย (Singh *et al.*, 2006)

2.3 หลักการทำงานของดี-สแตตคอม



ดี-สแตตคอมเป็นอุปกรณ์ที่ต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า ถูกใช้เป็นตัวชดเชยให้กับโหลด โครงสร้างของดี-สแตตคอมประกอบไปด้วยวงจรแปลงผัน ตัวเก็บประจุเชื่อมโยงกระแสตรง โครงสร้างของดี-สแตตคอมเมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายแสดงในภาพประกอบ 2.16 ซึ่งประกอบด้วย

1. วงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดันหรือที่นิยมเรียกว่าอินเวอร์เตอร์ จะแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากอินพุต ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุเชื่อมโยงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จ่ายให้กับวงจรกรองฮาร์มอนิกและแรงดันระลอก วงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดันจะเป็นแบบเฟสเดียว สามชุดต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส โดยในแต่ละชุดประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง IGBT เป็นต้น ที่หน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อวงจรชุดละ 4 ตัว การควบคุมและการทำงานของวงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดันแต่ละชุดอิสระต่อกัน



ภาพประกอบ 2.16 โครงสร้างของดี-สแตตคอมเมื่อต่อเข้ากับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

2. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดี-สแตตคอมต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตเพื่อใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเอาต์พุต ซึ่งสามารถใช้พลังงานที่เก็บสะสมในตัวเก็บประจุหรือแหล่งจ่ายต่างๆที่ติดตั้งเพิ่มเติมขึ้นได้ เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดัน ข้อดีของดี-สแตตคอมคือถ้ามีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงภายนอกที่เก็บหรือสะสมพลังงานเอาไว้ และมีพลังงานที่เก็บสะสมไว้เตรียมพร้อมสำหรับการทำงาน จะทำให้ดี-สแตตคอมสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงให้กับโหลดปลายทางที่ต่ออยู่ได้ เมื่อในระบบเกิดความผิดปกติต่างๆ แล้วทำให้เกิดไฟดับแต่โหลดยังสามารถทำงานต่อไปได้

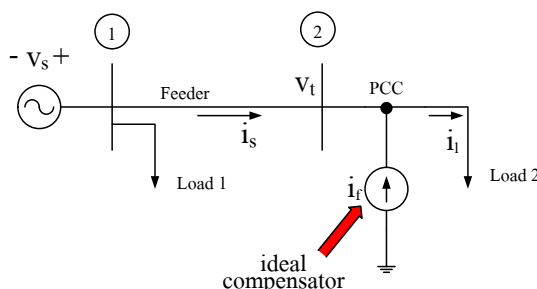


3. หม้อแปลงไฟฟ้าขนาน สำหรับแบบแผนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบขนาน แรงดันที่จ่ายได้มากที่สุดหาได้จากแรงดันเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าขนานจะต่อแบบขนานกับอุปกรณ์การสวิตช์หรืออินเวอร์เตอร์ การใช้งานจะเน้นที่ขนาดพอเหมาะและมีกำลังงานสูญเสีย น้อย

4. วงจรกรอง ใช้วงจรกรองแบบ LC-filter เพื่อใช้กรองฮาร์มอนิกและแรงดันระลอกที่มา จากอินเวอร์เตอร์แล้วผ่านสู่หม้อแปลงไฟฟ้าขนาน การสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์จะทำให้เกิดฮาร์มอนิก ซึ่ง จะต้องผ่านการกรองก่อนจ่ายให้กับโหลด

5. ชุดควบคุม จะประกอบด้วยชุดตรวจวัดกระแสที่โหลด เพื่อทำการตรวจสอบถึงสภาวะ กระแสของโหลดในแต่ละเฟส และชุดควบคุมการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในอินเวอร์เตอร์ โดยใช้การควบคุมแบบพัลส์วิธมอดูเลชัน (PWM) หรือการควบคุมแบบต่างๆ

ดี-สแตตคอมเป็นอุปกรณ์ที่ต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า จะทำงานในลักษณะสร้างแรงดันเอาต์พุต ได้ทั้งแบบ 3 เฟส สมดุลและไม่สมดุลขนานเข้ากับระบบนั้น โครงสร้างและระบบควบคุมจึงมีความ แตกต่างกัน การทำงานของดี-สแตตคอม ในกรณีที่ทำหน้าที่เป็นตัวชดเชยให้กับโหลดจะแทนด้วย แหล่งจ่ายอุดมคติ i_f ที่ต่อขนานเข้ากับโหลดบัสดังแสดงในภาพประกอบ 2.17 จากรูปกำหนดให้โหลด 2 เป็นรีแอกทีฟโหลดที่ไม่เชิงเส้นและสมดุล โดยในขณะที่ไม่มีการติดตั้งดี-สแตตคอมกระแส i_s ที่ไหล ผ่านสายป้อนจะมีลักษณะไม่สมดุล ผิดเพี้ยนตามกระแสของโหลดซึ่งส่งผลให้แรงดันที่บัสไม่สมดุลและ ผิดเพี้ยนตามไปด้วย เพื่อขจัดปัญหานี้อุปกรณ์ดี-สแตตคอมจะต้องฉีดกระแสเข้าไปในระบบ เพื่อชดเชย ให้กระแส i_s กลับมาเป็นกระแสสมมูลฐานและเป็นลำดับบวกเช่นเดิม นอกจากนี้ดี-สแตตคอมยังสามารถ บังคับให้กระแส i_s ให้มีเฟสตรงกันกับแรงดันบัสที่ 2 ได้อีกด้วย ดังนั้นการเชื่อมต่อในลักษณะนี้ดี-สแตต คอม จะทำหน้าที่ชดเชยกระแสให้โหลด และสามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลังของโหลดให้มีค่า ใกล้เคียง 1 ได้ เมื่อพิจารณาจุดเชื่อมต่อร่วม (Point of common coupling: PCC) ดังแสดงในภาพ ประกอบ 2.17



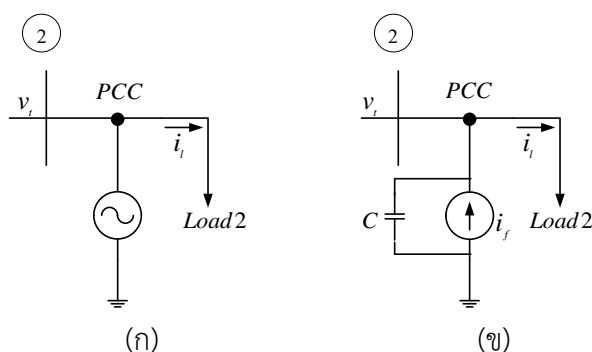
ภาพประกอบ 2.17 ดี-สแตตคอมทำหน้าที่ชดเชยให้กับโหลด

จะสามารถเขียนสมการของกระแสโดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟ (KCL) ดังนี้

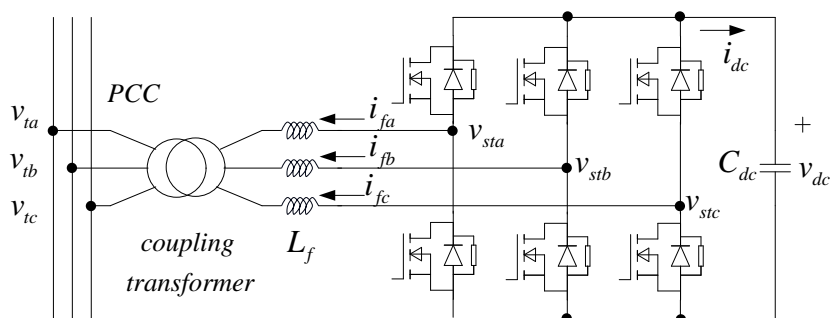


$$i_s = i_l - i_f \quad (2.2)$$

ดังนั้นในการชดเชยจะต้องสร้างกระแส i_f ในปริมาณที่สูงมาก เพื่อทำการหักล้างกำลังรีแอกทีฟและองค์ประกอบที่ไม่สมดุลอื่นๆของกระแสโหลดเช่น ฮาร์มอนิก แผนผังของการนำดี-สแตตคอมเพื่อใช้ในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ให้กับระบบไฟฟ้านั้นแสดงได้ดังภาพประกอบ 2.24 (ก) ซึ่งเป็นการจำลองในลักษณะของแหล่งจ่ายกระแสสลับทำให้เกิดความยุ่งยากในการพิจารณา ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจยิ่งขึ้น จึงแสดงในภาพประกอบ 2.18 (ข) กระแส i_f จะถูกฉีดเข้าไปในระบบเพื่อทำให้แรงดัน V_r มีค่าตามแรงดันอ้างอิงที่กำหนด ซึ่งในการทำงานในลักษณะนี้จะไม่มีการจ่ายหรือดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจริงในสภาวะคงตัว ในการพิจารณานิยมที่จะพิจารณาดี-สแตตคอมในภาพประกอบ 2.19 ที่เป็นวงจรแบบพื้นฐานของวงจรแปลงผันแรงดันสองระดับ



ภาพประกอบ 2.18 ดี-สแตตคอมในขณะทำงานเพื่อรักษาระดับแรงดัน

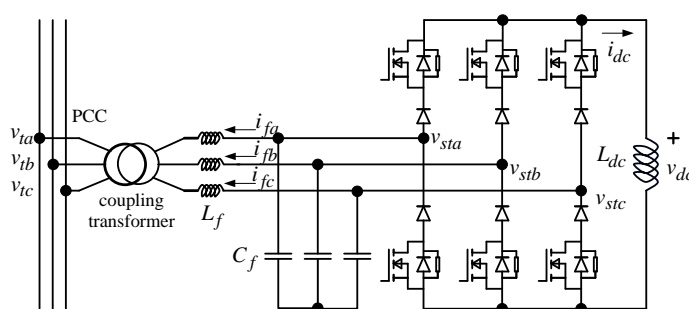


ภาพประกอบ 2.19 วงจรแปลงผันแรงดันแบบสองระดับ



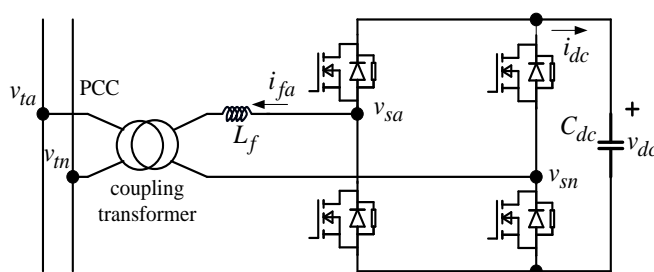
ในทางปฏิบัตินั้นแหล่งจ่ายกระแสจะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน ด้วยวงจรดังภาพประกอบ 2.19 ที่ประกอบด้วยวงจรแปลงผันแรงดันสามเฟส ตัวเหนี่ยวนำสำหรับกรองแรงดันและตัวเก็บประจุ เชื่อมโยงกระแสตรง วงจรแปลงผันถูกต่อเข้ากับระบบโดยผ่านทางหม้อแปลงไฟฟ้า และตัวเหนี่ยวนำ L_f ที่ทำหน้าที่กรองความถี่สูงที่เป็นองค์ประกอบของกระแส วงจรแปลงผันแรงดันเป็นอุปกรณ์สำคัญในการทำงานของดี-สแตตคอม ที่มีส่วนประกอบเป็นอุปกรณ์โซลิตสเทท ที่สามารถคอมมิวเตทด้วยตัวเองเช่น MOSFET (Metal oxide semiconductor field effect transistor), IGBT (Integrated gate bipolar transistor) โดยมีไดโอดต่อแบบย้อนกลับขนานร่วมด้วย อุปกรณ์โซลิตสเททของดี-สแตตคอมนั้น จะทำงานด้วยการสวิตช์จากสัญญาณ PWM ที่มีความถี่สูงมากต่อโซลิตสเทท ส่วนแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ทางด้านอินพุตของวงจรแปลงผันแรงดันนั้นก็คือ C_{dc} ที่เป็นผลของการทำงานของไดโอดเรียงกระแส วัตถุประสงค์หลักของดี-สแตตคอม คือการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าสามเฟสและลดฮาร์มอนิกของกระแสที่เกิดขึ้น เพื่อไม่ให้สัญญาณทางไฟฟ้าเกิดการผิดเพี้ยน และในขณะเดียวกันนั้นดี-สแตตคอมก็จะทำการรับและจ่าย กำลังไฟฟ้รีแอคทีฟเข้าสู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ด้วยหลักการสวิตช์ของอุปกรณ์โซลิตสเททซึ่งเป็นคุณสมบัติของดี-สแตตคอมนั่นเอง ค่าแรงดันของดี-สแตตคอม (V_{sr}) นั้นถูกควบคุมไปตามสัญญาณ PWM ตามการสวิตช์ของอุปกรณ์โซลิตสเทท

สำหรับการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันนั้น โดยทั่วไปจะมีโครงสร้างเป็นวงจรบริจท์ ซึ่งได้นำมาพัฒนาเป็น CPDs ในขณะเดียวกันการใช้วงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายกระแส (CSC) แต่เป็นที่นิยมน้อยกว่าเนื่องจากต้องทำการปรับปรุงในส่วนของวงจรกรอง (Routimo *et al.*, 2007) โครงสร้างของดี-สแตตคอมที่ใช้วงจรแปลงผันแบบ CSC ได้นำเสนอโครงสร้างพื้นฐานของดี-สแตตคอม ดังภาพประกอบ 2.20 ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของดี-สแตตคอมแบบ 3 เฟส 3 สาย ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบ 6 พัลส์ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทำงานภายใต้ข้อบังคับของแรงดันที่ขั้วทั้งสอง และค่าสูงสุดที่ได้จากตัวเก็บประจุ C_f ที่เป็นแรงดันระหว่างสายกับสาย (Line-to-Line) และในสภาวะคงตัวนั้นแรงดันที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันสายที่แหล่งจ่าย V_r สัญญาณ PWM จะต่อเชื่อมกับระบบไฟฟ้าโตนผ่านทางวงจรกรอง ที่จะกรองเอาองค์ประกอบของกระแสที่ไม่ต้องการออกไป แหล่งเก็บสะสมพลังงานของดี-สแตตคอมคือตัวเหนี่ยวนำ L_{dc} ที่มีกระแส i_{dc} ไหลผ่าน โดยกระแสจะมีค่าอย่างน้อยที่สุดคือที่สูงสุดของกระแสที่ต้องการชดเชย



ภาพประกอบ 2.20 โครงสร้างดี-สแตตคอมแบบแหล่งจ่ายกระแส 3 เฟส 3 สาย

ดี-สแตตคอมสามารถใช้ร่วมกับระบบเดิมที่มีการจ่ายโหลดอยู่แล้วเช่น 1 เฟส (2 สาย) และ 3 เฟส (3 สายหรือ 4 สาย) ที่มีโหลดในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นต่อรวมเช่น อุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน ที่ต้องต่อรวมกับระบบไฟฟ้า 1 เฟส หรือ โหลด 3 เฟส ที่ไม่สมดุลไม่มีสายนิวทรัล เช่นอุปกรณ์ปรับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า ส่วนดี-สแตตคอมที่นำไปใช้กับระบบ 1 เฟส จะเรียกว่า H-bridge ที่มีโครงสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจำนวน 4 ชุด เพื่อตัวสร้างสัญญาณ PWM ในการปรับปรุงระบบไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 2.21

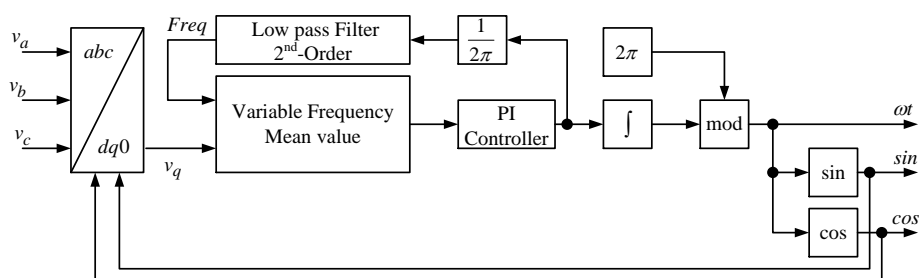


ภาพประกอบ 2.21 โครงสร้างดี-สแตตคอมแบบ H-bridge หรือ แบบ 1 เฟส 2 สาย

2.4 การควบคุมการทำงานของดี-สแตตคอม

จุดประสงค์หลักของดี-สแตตคอมคือการชดเชยแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบ ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพลวัตอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในการทำงานของดี-สแตตคอมที่จะตอบสนองได้รวดเร็วเพียงใดนั้น ก็ขึ้นอยู่กับวิธีการควบคุม หลักการโดยรวมของการควบคุมการทำงานของดี-สแตตคอมได้ใช้เทคนิคการแปลงสัญญาณ โดยแปลงแกน dq (Jazayeri and Fendereski, 2007) ในกรอบอ้างอิงการหมุนซิงโครนัส (Synchronous rotating reference frame) จากนั้น (Singh *et al.*, 2006) ก็ได้มีการคิดค้นรูปแบบการแปลงสัญญาณในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง $\alpha - \beta$ (Stationary reference frame) เนื่องจากสัญญาณอ้างอิงที่ได้จากสัญญาณเดิมนั้น เอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์มีความต้องการที่จะให้เกิดขึ้นไปพร้อมกับแรงดันที่ระบบ จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ตัวติดตามเฟส PLL ที่จะใช้เกาะติดสัญญาณเฟสและความถี่ ที่เป็นด้านบวกของแรงดันมูลฐานที่ระบบ โครงสร้างของ PLL แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.22





ภาพประกอบ 2.22 โครงสร้างของตัวติดตามเฟส PLL

หลังจากที่ใช้ PLL เพื่อเกาะติดกับสัญญาณมูลฐานแล้ว ได้นำมาจัดหมวดหมู่ได้เป็นแบบเชิงเส้น (Jazayeri *et al.*, 2007) แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Shukla *et al.*, 2005) และแบบเทคนิคพิเศษ (Xiao-Ping Yang *et al.*, 2008)

การพัฒนาของสัญญาณชดเชยเป็นส่วนสำคัญที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของดี-สแตตคอม ในภาวะชั่วขณะจนถึงภาวะคงตัว เทคนิคที่ใช้ควบคุมสัญญาณชดเชยที่ถูกสร้างขึ้น จะอยู่ในโดเมนของความถี่ (Frequency domain) หรือโดเมนของเวลา (Time domain) ดี-สแตตคอมที่ใช้วิธีการโดเมนของเวลานั้นจะส่งสัญญาณเวกเตอร์ ของกระแสและแรงดันในทันทีทันใด และขณะเดียวกันนั้นสัญญาณที่ได้มาก็จะแปลงให้อยู่ในรูป dq ในแนวแกนหมุนเชิงโคโรนัส ซึ่งเทคนิคการควบคุมเช่น PI หรือ PID ถูกนำมาใช้ประมวลผลสัญญาณที่ได้รับ เพื่อที่จะนำสัญญาณดังกล่าวมาทำการชดเชย สิ่งที่ถูกเพิ่มเติมขึ้นมาคือองค์ประกอบที่สมมาตรและยูนิตเวกเตอร์ ที่ใช้ควบคุมความถูกต้องแม่นยำตามสัญญาณอ้างอิงในโดเมนของเวลา ในโหมดการควบคุมสัญญาณ PWM ที่นิยมใช้คือ การควบคุมแรงดัน การควบคุมกระแส (Ghosh *et al.*, 2002) เทคนิคการควบคุมกระแสนั้นได้รายงานในวรรณกรรมอย่างแพร่หลายในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น

ในการควบคุมแบบเชิงเส้นมีรายงานถึงการควบคุมที่ผ่านมาดังนี้ วิธีการควบคุมแบบ PI ในกรอบหุคหนึ่ง การควบคุมแบบเวกเตอร์ PI บนกรอบอ้างอิงเชิงโคโรนัส การควบคุมการป้อนกลับแบบสถานะ (State feedback control) การควบคุมแบบคาดการณ์ (Predictive control) และเดดบีสคอนโทรล (Dead-beat control)

ส่วนการควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้นประกอบด้วย การควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิสคอนโทรล (Hysteresis control) แบบเดลต้ามอดูเลชัน (Delta modulation) และแบบค่าที่เหมาะสมแบบออนไลน์ (Online optimized controller)

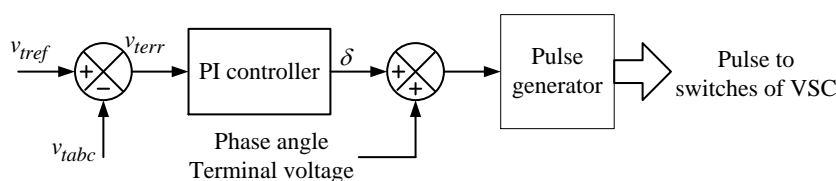
การสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อกระตุ้นให้ VSC ทำงานนั้นเป็นสิ่งสำคัญ ทั้งนี้ในการสวิตช์ได้มีการสูญเสียที่อุปกรณ์อยู่แล้ว ดังนั้นจากการทดสอบเพื่อออกแบบให้มีความถี่ของการสวิตช์ที่เลื่อน



ออกมาจากความถี่มูลฐาน และเกิดการสูญเสียพลังงานที่น้อยที่สุด จึงใช้การสร้างสัญญาณพัลส์เป็นแบบ PWM ขึ้น นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่นๆที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของดี-สแตตคอมเช่น

2.4.1 การควบคุมแบบเลื่อนเฟส (Phase shift control)

การควบคุมแบบเลื่อนเฟส (Anaya-Lara *et al.*, 2002) นั้นมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน มีจุดมุ่งหมายคือการรักษาแรงดันไฟฟ้าที่โหลดให้คงที่ โดยหลักการในการทำงานคือนำแรงดันที่โหลด $v_{t,abc}$ มาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง v_{ref} เพื่อสร้างเป็นสัญญาณผิดพลาด v_{terr} จากนั้นถึงจะป้อนสัญญาณผิดพลาดนี้ไปสู่ ตัวควบคุมแบบ PI เพื่อจะสร้างมุม δ โดยที่มุม δ ที่ได้ นั้นจะนำมาเปรียบเทียบกับมุมเฟสของแรงดันที่ขั้วอีกครั้ง ก่อนที่จะถูกส่งไปยังส่วนสร้างสัญญาณพัลส์ เพื่อไปสั่งอุปกรณ์สวิตช์ของ VSC ให้ทำงาน ในส่วนของด้านแรงดันกระแสตรงจะถูกจ่ายให้โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่แยกไว้ โครงสร้างของการควบคุมแบบเลื่อนเฟสในดี-สแตตคอม แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.23



ภาพประกอบ 2.23 โครงสร้างการควบคุมแบบเลื่อนเฟสของดี-สแตตคอม

ข้อดีของการควบคุมด้วยวิธีการนี้ คือมีวิธีการควบคุมที่ง่ายสามารถนำไปสร้างเครื่องมือทดสอบได้อย่างแม่นยำ เพราะต้องการวัดเฉพาะแรงดันเท่านั้น

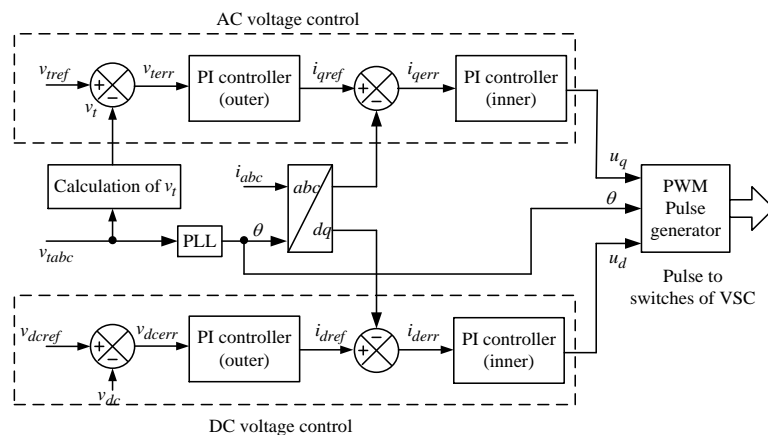
ข้อเสียของการควบคุมด้วยวิธีการนี้ คือไม่มีแหล่งพลังงานกระแสตรงของตัวเองที่จะสนับสนุนการทำงานด้านฝั่งแรงดันกระแสตรง จะต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากภายนอก เพื่อทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ เพื่อให้ดี-สแตตคอมทำงาน จึงมาสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ ทำให้เกิดปัญหาในการเลือกขนาดของ คาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งในดี-สแตตคอม

2.4.2 การควบคุมแบบกำหนดความถี่ (Carrier Based PWM Control)

การควบคุมแบบกำหนดความถี่ (Schauder *et al.*, 1993; Freitas *et al.*, 2002) จะกำหนดค่าความถี่ของรูปคลื่นไซน์ของ PWM เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณพัลส์ของอุปกรณ์สวิตช์ VSC วิธีการนี้อยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีกาลังรีแอกทีฟชั่วขณะ ค่าแรงดันและกระแสชั่วขณะของโหลดจะถูกวัดระบบไฟฟ้าสามเฟสที่แปลงในรูปของแกน dq บนกรอบอ้างอิงการหมุนซิงโครนัส ด้วยวิธีการแปลงของปาร์ค การทำการชดเชยนั้นเป็นการควบคุมกระแสแอกทีฟ (i_d) และกระแสรีแอกทีฟ (i_q) กำลังไฟฟ้า



P และกำลังรีแอกทีฟ Q จะถูกฉีดเข้าระบบด้วยดี-สแตตคอม โครงสร้างของการควบคุมด้วยวิธีนี้แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.24



ภาพประกอบ 2.24 โครงสร้างการควบคุมแบบกำหนดความถี่

ภายใต้กรอบอ้างอิง dq จะเขียนสมการกำลังไฟฟ้า P และ Q ได้ ดังสมการที่ (2.3)

$$p = v_{id}i_d + v_{iq}i_q \quad (2.3)$$

$$q = v_{iq}i_d - v_{id}i_q \quad (2.4)$$

สำหรับระบบสามเฟสสมดุล $v_{iq} = 0$ ทำให้กำลังไฟฟ้า P และ Q ดังสมการที่ (2.5)

$$p = v_{id}i_d \quad (2.5)$$

$$q = -v_{id}i_q$$

ค่ากระแสไฟฟ้าชั่วขณะอ้างอิง i_d ถูกสร้างมาจากชุดควบคุม PI ของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ชั่วและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอ้างอิงในส่วนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในทำนองเดียวกันกระแสอ้างอิง i_q ถูกสร้างมาจากชุดควบคุม PI ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ชั่วและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอ้างอิงในส่วนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ในกรณีที่ต้องการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลัง กระแสอ้างอิง i_q ถูกเซตให้มีค่าเป็น 0 โดยที่ i_d และ i_q ถูกเปลี่ยนจากองค์ประกอบ abc เป็นองค์ประกอบ dq ที่เป็นการวัดกระแสสามเฟสชั่วขณะ ดังนั้นตัวควบคุมแบบ PI จึงต้องถูกแยกออกจากกันเป็นสองส่วนเพื่อเป็นส่วนสำหรับอ้างอิงกระแส i_d และ i_q ที่ได้รับก่อนหน้านี้ ดังนั้นในการประสานความสัมพันธ์ระหว่างแกน abc เป็น dq ตัวติดตามเฟส (PLL) จึงถูกนำมาใช้ จาก



ภาพประกอบ 2.24 แรงดันสามเฟสที่ชั่ว (v_{ia}, v_{ib}, v_{ic}) เป็นค่าขนาดของรูปคลื่นไซน์ที่เป็น rms สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.6)

$$v_t = \sqrt{\frac{2}{3}(v_{ia}^2 + v_{ib}^2 + v_{ic}^2)} \quad (2.6)$$

แรงดัน V_t จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง v_{tref} เพื่อจะได้ v_{terr} จะได้

$$v_{terr} = (V_{tref} - V_t) \quad (2.7)$$

เมื่อ V_t คือขนาดของแรงดันกระแสสลับที่ชั่วของ PCC ค่าแรงดันไฟฟ้า v_{terr} ที่ได้รับมาจะถูกป้อนไปยังชุดควบคุม PI เพื่อทำการรวมและสร้างเป็น i_{qref}

$$i_{qref} = K_{Pac} v_{terr} + K_{Iac} \int v_{terr} dt \quad (2.8)$$

เมื่อ K_{Pac} และ K_{Iac} คือค่าคงที่ของพารามิเตอร์ PI ที่ลูบนอกของชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับที่ชั่ว PCC ปริมาณที่แท้จริงของ i_q คือค่าที่ได้จากการแปลงสัญญาณในกรอบ abc ไปสู่กรอบ dq ตามคุณสมบัติของพาร์คไปเป็นกระแสของดี-สแตตคอม กระแส i_{qref} และ i_q เมื่อนำมาทำการเปรียบเทียบกันจะเป็นค่ากระแส i_{qerr} ป้อนเข้าสู่ลูบในของตัวควบคุมกระแส PI เพื่อสร้างสัญญาณ u_q

$$i_{qerr} = (i_{qref} - i_q) \quad (2.9)$$

$$u_q = K_{Piq} + K_{Iiq} \int i_{qerr} dt \quad (2.10)$$

เมื่อ K_{Piq} และ K_{Iiq} คือค่าคงที่ของพารามิเตอร์ PI ที่ลูบในของชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับที่ชั่ว PCC สำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่บัสของดี-สแตตคอม V_{dc} เป็นแรงดันกระแสตรงที่บัสที่นำมาเปรียบเทียบกับแรงดันกระแสตรงอ้างอิงดังนั้น v_{dcerr} คือ

$$v_{dcerr} = (V_{dc} - V_{dcref}) \quad (2.11)$$



เมื่อ V_{dc} คือแรงดันกระแสตรงที่บัสของดี-สแตตคอม ค่า v_{dcerr} จะถูกป้อนสู่ส่วนควบคุม PI ที่ลูปนอกเพื่อสร้าง i_{dref}

$$i_{dref} = K_{Pdc}v_{dcerr} + K_{Idc} \int v_{dcerr} dt \quad (2.12)$$

เมื่อ K_{Pdc} และ K_{Idc} คือค่าคงที่ของ PI ที่ลูปนอกของชุดควบคุมแรงดันกระแสตรงที่บัสแรงดันกระแสตรง ปริมาณที่แท้จริงของ i_d คือค่าที่ได้จากการแปลงสัญญาณในกรอบ abc ไปสู่กรอบของ dq ที่เป็นไปตามคุณสมบัติของพาร์คที่ข้ามไปเป็นกระแสของดี-สแตตคอม โดยกระแส i_{dref} และ i_d เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะเป็นค่ากระแส i_{derr} ป้อนเข้าสู่ลูปในของตัวควบคุมกระแสแบบ PI เพื่อสร้างสัญญาณ u_d ดังสมการที่ (2.13)

$$i_{derr} = (i_{dref} - i_d) \quad (2.13)$$

$$u_d = K_{Pi_d} i_{derr} + K_{Li_d} \int i_{derr} dt \quad (2.14)$$

เมื่อ K_{Pi_d} และ K_{Li_d} คือค่าคงที่ของ PI ที่ลูปในของชุดควบคุมแรงดันกระแสตรงที่บัสแรงดันกระแสตรง

PWM ที่ใช้สำหรับการควบคุมกระแสนั้นสัญญาณ u_d และ u_q ที่ได้จะถูกมอดูเลทด้วยดัชนีการมอดูเลท m และมุมเฟส δ เพื่อใช้สร้างสัญญาณ PWM ในการขับอุปกรณ์การสวิตช์ของ VSC นี้จึงทำให้ดี-สแตตคอมสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ขั้วของ PCC ด้วยการสร้างหรือดูดซับกระแสรีแอกทีฟและอื่นๆ ที่จำเป็นในการสร้างหรือดูดซับกำลังแอกทีฟจากระบบ เพื่อรักษาระดับแรงดันในฝั่งด้านกระแสตรงของคอนเวอร์เตอร์

ข้อดีของการควบคุมด้วยวิธีการกำหนดความถี่

1. มีส่วนสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าด้านบัสกระแสตรงด้วยตัวเอง
2. การควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟเป็นอิสระต่อกันด้วยการควบคุม i_d และ i_q
3. การควบคุมและรักษาแรงดันที่บัสกระแสตรงแยกจากบัสกระแสสลับ คล้ายกับการรักษาแรงดันหรือปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังที่โหลดสมดุล
4. การสวิตช์ของอุปกรณ์จะมีความถี่คงที่ จึงทำให้การสูญเสียของการสวิตช์อยู่ที่พิกัดของอุปกรณ์การสวิตช์ของ VSC



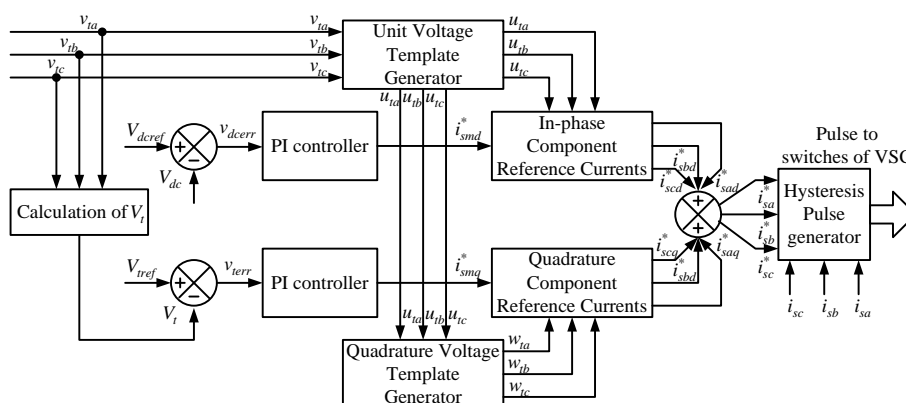
5. การควบคุมนี้มีลักษณะเป็นเชิงเส้นโดยใช้การควบคุม PI หรือ PID ซึ่งลดความซับซ้อนของโครงสร้างในการผลิตขึ้นมาใช้งาน

ข้อดีของการควบคุมด้วยวิธีการกำหนดความถี่

1. ขจัดฮาร์มอนิกได้น้อยมาก ทำให้ต้องต่อร่วมกับตัวกรองขานและอนุกรม ร่วมเข้าไปเพื่อขจัดฮาร์มอนิก
2. มีชุดควบคุม PI จำนวน 4 ชุด ทำให้ใช้เวลาในการตอบสนองมากขึ้น
3. โครงสร้างการทำงานเป็นความ มสัมพันธ์ระหว่างความถี่มูลฐานกับ PLL หากเกิดการเพี้ยนของสัญญาณ PLL จะทำให้เกิดความผิดพลาด
4. สามารถใช้ได้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สายที่สมดุลไม่สามารถใช้กับระบบไฟฟ้าเฟสเดียวได้
5. ในภาวะชั่วขณะกระแสมีโอเวอร์ชู้ตสูงมาก
6. ต้องใช้ตัวกรองขนาดใหญ่ต่อร่วมกับด้านของไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อทำการลดทรานเซียนและฮาร์มอนิก แต่จะลดค่ากำลังรีแอกทีฟที่สร้างขึ้นจากตัวเก็บประจุของ VSC เช่นกัน

2.4.3 การควบคุมแบบฮีเทอริซีส (Carrier Less Hysteresis Control)

โครงสร้างการควบคุมด้วยวิธีนี้สามารถปรับตัวได้ง่ายและมีรายงานการวิจัยอย่างกว้างขวาง (Kasal and Singh, 2008) สำหรับการปรับปรุ้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและรักษาระดับแรงดัน นอกเหนือจากโหลดสมดุล ลดค่าฮาร์มอนิก แม้เกิดการหลุดของโหลดได้มีรายงานที่แตกต่างกันในการพิจารณาขนาดของกระแสแอกทีฟและรีแอกทีฟที่ถูกสร้างขึ้นด้วยดี-สแตตคอม รายงานที่ได้กล่าวไว้สำหรับการควบคุมวิธีนี้ว่า เป็นวิธีการที่มีความยุ่งยากน้อยที่สุดของการนำตัวควบคุมแบบ PI คือนำมาใช้ในการควบคุมแบบฮีเทอริซีส ดังแสดงในภาพประกอบ 2.25



ภาพประกอบ 2.25 โครงสร้างการควบคุมแบบ PI สำหรับฮีเทอริซีส



หน่วยของเวกเตอร์แรงดันในองค์ประกอบอินเฟส (In-phase) และตั้งฉาก (Quadrature) ได้จากแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว เวกเตอร์อินเฟส (u_{ia}, u_{ib} และ u_{ic}) จะคำนวณโดยการหารค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ขั้ว (v_{ia}, v_{ib} และ v_{ic}) ด้วยขนาดของชุดเวกเตอร์แรงดันตั้งฉาก V_t (w_{ia}, w_{ib} และ w_{ic}) เป็นฟังก์ชันไซน์ที่ได้รับจากองค์ประกอบอินเฟส เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ PCC ซึ่งขนาดของแรงดัน V_t จะถูกเปรียบเทียบระหว่างแรงดันอ้างอิง v_{tref} และสัญญาณแรงดัน v_{terr} จากนั้นจะถูกส่งไปประมวลผลที่ตัวควบคุมแบบ PI เอาต์พุตของตัวควบคุม PI ที่ได้คือ i_{smq}^* ซึ่งจะมีผลต่อการกำหนดขนาดของกระแสแอกทีฟที่จะถูกสร้างขึ้นจากดี-สแตตคอม ผลคูณระหว่างองค์ประกอบตั้งฉากกับ i_{smq}^* จะก่อให้เกิดกระแสอ้างอิงในองค์ประกอบตั้งฉาก ดี-สแตตคอมมีแหล่งให้พลังงานด้านการควบคุมแรงดันกระแสตรงด้วยตนเองคือ กระแสอัดประจุที่ได้รับจาก PCC

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่บัส V_{dc} จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ V_{dcref} ค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง V_{dcerr} จะถูกส่งไปประมวลผลที่ตัวควบคุม PI เอาต์พุตของตัวควบคุม PI ที่ได้คือ i_{smd}^* ซึ่งจะกำหนดขนาดของกระแสแอกทีฟที่จะถูกสร้างขึ้นจากดี-สแตตคอม ผลคูณระหว่างองค์ประกอบอินเฟสกับ i_{smd}^* จะก่อให้เกิดกระแสอ้างอิงในองค์ประกอบอินเฟส ส่วนค่ากระแสอ้างอิงที่ได้นั้น เกิดจากผลรวมของกระแสอ้างอิงในองค์ประกอบอินเฟสและองค์ประกอบตั้งฉาก ส่วนการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิสจะถูกกำหนดด้วยแถบที่มีขนาด $\pm h$ เพื่อใช้คำนวณค่ากระแสอ้างอิง โดยที่

ถ้า $(i_{sa} - i_{sa}^*) > +h$ จะเกิดสัญญาณพัลส์ในแถบด้านล่าง (Low) ของ VSC

และ $(i_{sa} - i_{sa}^*) < -h$ จะเกิดสัญญาณพัลส์ในแถบบนของ VSC

จากภาพประกอบ 2.32 แรงดันกระแสสลับที่ขั้วของ PCC (v_{ia}, v_{ib} , และ v_{ic}) เป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์มีค่าขนาดเป็นค่า rms สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.15) และเวกเตอร์ของ u_{ia}, u_{ib} และ u_{ic} สามารถหาได้ดังสมการที่ (2.16)

$$V_t = \sqrt{\frac{2}{3}(v_{ia}^2 + v_{ib}^2 + v_{ic}^2)} \quad (2.15)$$

$$u_{ia} = \frac{v_{ia}}{V_t}$$

$$u_{ib} = \frac{v_{ib}}{V_t} \quad (2.16)$$

$$u_{ic} = \frac{v_{ic}}{V_t}$$

เวกเตอร์ขององค์ประกอบตั้งฉาก หาได้จากการแปลงค่าของเวกเตอร์ขององค์ประกอบอินเฟส ตามสมการต่อไปนี้



$$w_{ta} = -\frac{u_{tb}}{\sqrt{3}} + \frac{u_{tc}}{\sqrt{3}} \quad (2.17)$$

$$w_{tb} = \frac{\sqrt{3}}{2} u_{ta} + (u_{tb} - u_{tc}) \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.18)$$

$$w_{tc} = -\frac{\sqrt{3}}{2} u_{ta} + (u_{tb} - u_{tc}) \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.19)$$

และค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟสลับที่ขั้วของ PCC คือ

$$v_{terr} = (V_{tref} - V_t) \quad (2.20)$$

เมื่อ V_{tref} คือขนาดของแรงดันอ้างอิงกระแสสลับที่ PCC
 V_t คือขนาดของแรงดันกระแสสลับที่ขั้ว PCC

ขนาดของ i_{smq}^* ขององค์ประกอบตั้งฉากที่เป็นค่ากระแสอ้างอิงของดี-สแตตคอม ซึ่งก็คือค่าเอาต์พุตที่ได้จากชุดควบคุม PI สำหรับใช้รักษาแรงดันกระแสสลับที่ขั้วให้คงที่ หาได้โดย

$$i_{smq}^* = K_{Pismq} v_{terr} + K_{Iismq} \int v_{terr} dt \quad (2.21)$$

โดยที่ K_{Pismq} และ K_{Iismq} คือค่าคงที่ของชุดควบคุม PI ตามลำดับ v_{terr} คือค่าความผิดพลาดของแรงดันกระแสสลับ สำหรับองค์ประกอบตั้งฉากของกระแสอ้างอิงดี-สแตตคอมหาได้โดย

$$\begin{aligned} i_{saq}^* &= i_{smq}^* w_{ta} \\ i_{sbq}^* &= i_{smq}^* w_{tb} \\ i_{scq}^* &= i_{smq}^* w_{tc} \end{aligned} \quad (2.22)$$

สำหรับองค์ประกอบอินเฟสของกระแสอ้างอิงดี-สแตตคอม ความผิดพลาดของแรงดันกระแสตรงที่บัสกระแสตรงคือ v_{dcerr} หาค่าได้จากสมการ

$$v_{dcerr} = (V_{dcref} - V_{dc}) \quad (2.23)$$



เมื่อ $v_{dc\text{ref}}$ คือแรงดันอ้างอิงกระแสตรง และ V_{dc} คือแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยงของดี-สแตตคอม เอาต์พุตของชุดควบคุม PI ที่ใช้รักษาระดับแรงดันกระแสตรงที่บัสของดี-สแตตคอมหาได้จาก

$$i_{smd}^* = K_{Pi_{smd}} v_{dc\text{err}} + K_{I_{smd}} \int v_{dc\text{err}} dt \quad (2.24)$$

เมื่อ i_{smd}^* คือขนาดของกำลังแอกทีฟที่ใช้งานของดี-สแตตคอม

$K_{Pi_{smd}}$ คือค่าคงที่ของชุดควบคุม P ที่บัสกระแสตรง

$K_{I_{smd}}$ คือค่าคงที่ของชุดควบคุม I ที่บัสกระแสตรง

ในส่วนขององค์ประกอบอินเฟสของกระแสอ้างอิงดี-สแตตคอมหาได้โดย

$$\begin{aligned} i_{sad}^* &= i_{smd}^* w_{ta} \\ i_{sbd}^* &= i_{smd}^* w_{tb} \\ i_{scd}^* &= i_{smd}^* w_{tc} \end{aligned} \quad (2.25)$$

ดังนั้นกระแสอ้างอิงดี-สแตตคอมจะได้จากผลรวมของกระแสอ้างอิงในองค์ประกอบอินเฟสและองค์ประกอบตั้งฉาก

$$\begin{aligned} i_{sa}^* &= i_{saq}^* + i_{sad}^* \\ i_{sb}^* &= i_{sbq}^* + i_{sbd}^* \\ i_{sc}^* &= i_{scq}^* + i_{scd}^* \end{aligned} \quad (2.26)$$

กระแสอ้างอิงดี-สแตตคอมถูกเปรียบเทียบกับกระแสของดี-สแตตคอม รูปแบบในการหยุดและนำกระแสของชุดขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์จะถูกสร้างมาจากอีทเตอร์รีซีส

ข้อดีของการควบคุมแบบอีทเตอร์รีซีส

1. เป็นวิธีการที่ภายในโครงสร้างมีคุณสมบัติสนับสนุนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวเอง
2. มีความสะดวกและแข็งแรงและยังสามารถจำกัดปริมาณของกระแสไฟฟ้าได้
3. กระแสของดี-สแตตคอมมีค่าฮาร์มอนิกต่ำ
4. มีชุดควบคุม PI เพียงสองชุด ไม่ต้องการชุด PLL อีกทั้งและไม่ต้องการแปลงจากสัญญาณรูป abc ไปเป็น แกน dq ซึ่งจะช่วยในผลการตอบสนองทางพลวัต



5. เป็นวิธีการที่แก้ไขได้ง่ายเนื่องจากได้ได้ชุดควบคุม PI เพียง 2 ชุดเท่านั้น (ลดลง 2 ชุด) ทำให้การประมาณค่าและกระแสอ้างอิงได้รวดเร็ว และได้รับผลตอบแทนที่ดีกว่าของดี-สแตดคอม

6. สามารถใช้งานในระบบ 3 เฟส 4 สายได้ง่าย ด้วยการใช้ VSC แบบ 4 กิ่ง ที่การควบคุมสามารถแยกกันได้

ข้อดีของการควบคุมแบบฮิเตอร์รีซีส

1. เกิดแรงดันระลอก (Ripples) มีค่าสูง จึงต้องมีการกรองอย่างเหมาะสม
2. การสวิตช์ของอุปกรณ์แปลงผันขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของระบบ ที่อาจจะมี ความถี่สูงมากทำให้เกิดการสูญเสียมากเกินไปในการสวิตช์ของการอุปกรณ์
3. การดำเนินการด้านโครงสร้างของส่วนควบคุม มีความยุ่งยาก

2.5 วิธีการจีเนติก (Genetic algorithm)

จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm) หรือเรียกโดยย่อว่า “GA” เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการค้นหาและแก้ปัญหาเพื่อให้ได้จุดที่เหมาะสมที่สุด ได้รับการพัฒนาโดยการจำลองวิธีการมาจากกระบวนการทางพันธุกรรม (Holland, 1975) สำหรับหลักการของวิธีการนี้คือสิ่งมีชีวิตทั้งหลายมีทั้งส่วนที่ดีและไม่ดี ซึ่งลักษณะที่ดีจะได้รับการสนับสนุนให้มีการถ่ายทอดทางพันธุกรรม จากบรรพบุรุษสู่รุ่นลูกหลาน GA เป็นขั้นตอนในการค้นหาคำตอบโดยมีพื้นฐานมาจาก กระบวนการคัดเลือกตามธรรมชาติ (Natural selection) และกระบวนการคัดเลือกทางพันธุศาสตร์ (Natural genetics selection) GA เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเชิงผสมผสาน (Combinatorial optimization method) ที่มีความสามารถในการค้นหาคำตอบอย่างชาญฉลาดและไม่ยุ่งยาก (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

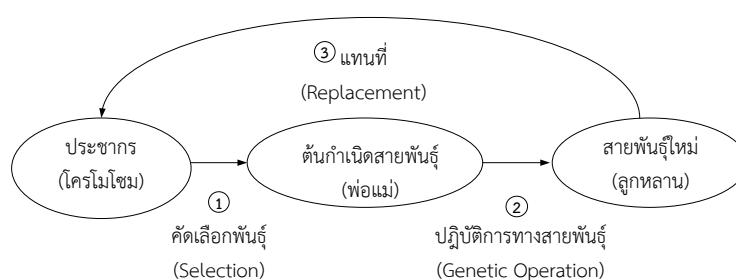
2.5.1 วัฏจักรการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม

GA เป็นขั้นตอนในการค้นหาคำตอบให้กับระบบ สามารถมอง GA เป็นเครื่องมือในการช่วยคำนวณอย่างหนึ่งที่ ระบบวัฏจักรของ GA โดยธรรมชาติแล้วประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญได้แก่

1. การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) คือ ขั้นตอนในการคัดเลือกประชากรที่ดีในระบบไปเป็นต้น กำเนิดสายพันธุ์ เพื่อให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นต่อไป
2. ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic operation) คือกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมโดยวิธีการทางสายพันธุ์ เป็นขั้นตอนการสร้างลูกหลานซึ่งจากการรวมพันธุ์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์เพื่อให้ได้ลูกหลานที่มีส่วนผสมผสานมาจากพ่อแม่ หรือได้จากการแปรผันยีนของพ่อแม่เพื่อให้ได้ลูกหลานสายพันธุ์ใหม่เกิดขึ้น



3. การแทนที่ (Replacement) คือขั้นตอนการนำเอาลูกหลานกำเนิดใหม่ไปแทนที่ประชากรเก่าในรุ่นก่อน เป็นขบวนการในการคัดเลือกว่าควรจะนำเอาลูกหลานในกลุ่มใดไปแทนประชากรเก่าในกลุ่มใด จำนวนเท่าไร ไปแทนประชากรเก่าในกลุ่มใด วัฏจักรของ GA แสดงให้เห็นถึงความเหมือนกับการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ สิ่งมีชีวิตที่มีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าก็จะสามารถอยู่รอดได้ ในขณะที่สิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่ไม่สามารถปรับตัวเองได้จะต้องสูญพันธุ์ไป การปรับตัวดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสิ่งมีชีวิตนั้นมีวิวัฒนาการ GA มีการจำลองวิวัฒนาการของระบบที่มีอยู่เกิดวิวัฒนาการในตัวเอง อันนำไปสู่การปรับตัวให้กลายเป็นคำตอบที่ดีกว่าและดีที่สุดได้ รายละเอียดต่างๆ ขององค์ประกอบในวัฏจักร GA ดังแสดงในภาพประกอบ 2.26



ภาพประกอบ 2.26 วัฏจักรการทำงานของ GA (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

องค์ประกอบของ GA มีส่วนประกอบหลักอยู่ 3 ส่วน คือ

1. ประชากร (Population) ที่ประกอบไปด้วยโครโมโซม (Chromosome) ซึ่งจะเป็นตัวแทนของคำตอบในระบบที่ต้องการค้นหา

2. ต้นกำเนิดสายพันธุ์ (Parents) หรือพ่อแม่ จะถูกคัดเลือกจากกลุ่มของประชากรเพื่อเป็นการสร้างสายพันธุ์ใหม่ (Next generation) ที่จะเป็นตัวแบบในการสืบทอดสายพันธุ์ในรุ่นลูกหลานต่อไป

3. สายพันธุ์ใหม่ (Offspring) หรือเป็นลูกหลานที่สืบทอดมาจากพ่อแม่ เป็นประชากรกลุ่มใหม่ที่คาดว่าจะได้รับสายพันธุ์ที่ดีที่สุด เพื่อทำการถ่ายทอดไปยังรุ่นต่อไป

จากวัฏจักรการทำงานและองค์ประกอบของ GA เมื่อนำมาเชื่อมโยงเข้ากับระบบเพื่อทำการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้ทำการกำหนดไว้ จะมีลำดับขั้นตอนในการทำงานดังนี้

2.5.2 ขั้นตอนการทำงานของ GA

ขั้นตอนการทำงานของ GA เมื่อทำการเชื่อมโยงเข้าสู่ระบบ เพื่อที่จะทำการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด มีขั้นตอนในการทำงานดังนี้ (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

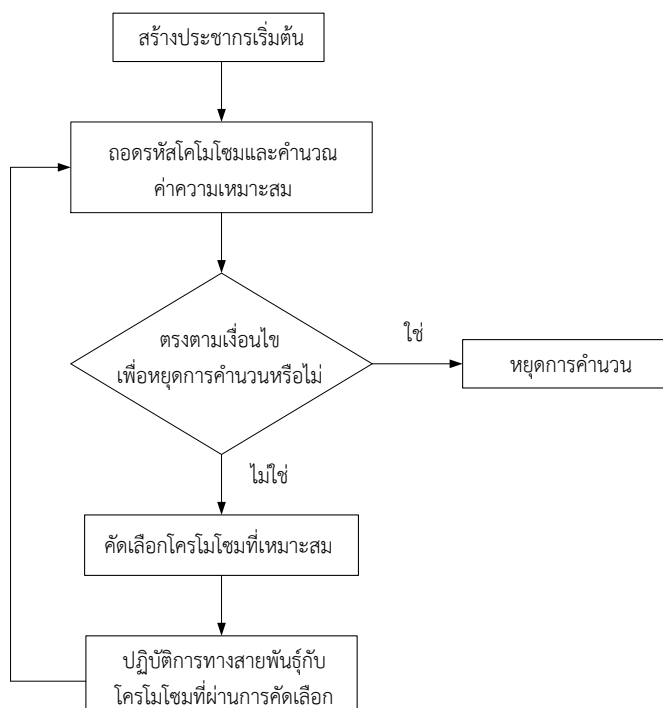
1. สร้างกลุ่มประชากร ซึ่งโดยปกติแล้ว GA จะใช้วิธีการสุ่มค่า (Random)



2. ประเมินค่าโครโมโซมของกลุ่มประชากรทั้งหมดด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เนื่องจากจะยังไม่สามารถเข้าใจค่าของโครโมโซมภายใน GA ดังนั้นโครโมโซมจะต้องผ่านการถอดรหัส ก่อนที่จะนำไปทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
3. คำนวณหาค่าความเหมาะสม (Fitness) แล้วส่งกลับไปยัง GA
4. คัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่ม ที่จะนำมาเป็นพ่อ แม่ เพื่อเป็นต้นกำเนิดในการถ่ายทอดสายพันธุ์ต่อไป โดยการคัดเลือกโครโมโซมที่เหมาะสมนั้นจะใช้ค่าความเหมาะสมเป็นตัวคัดเลือก
5. นำพ่อแม่ที่เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์นั้น มาทำการสร้างลูกหลานด้วยวิธีปฏิบัติการทางสายพันธุ์ ซึ่งโครโมโซมที่ได้จากขั้นตอนนี้คือโครโมโซมลูกหลาน
6. ทำการคำนวณหาค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลาน เช่นเดียวกับขั้นตอนในข้อที่ 3
7. พ่อแม่หรือโครโมโซมเดิมจะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมที่ได้ในขั้นตอนที่ 5 ซึ่งจะมีประชากรบางส่วนเท่านั้นที่จะถูกแทนที่ด้วยวิธีการเฉพาะสำหรับในขั้นตอนของการแทนที่ โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสินใจ
8. ทำการคำนวณซ้ำตั้งแต่ลำดับที่ 2 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการ ซึ่งคำตอบที่ต้องการนั้น จะเป็นคำตอบที่ได้มาจากโครโมโซมที่ดีที่สุดในกลุ่มประชากรนั่นเอง โดยใช้ค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อประเมินถึงคำตอบที่ต้องการหรือไม่

จากขั้นตอนการทำงานดังกล่าวข้างต้น สามารถแสดงได้ด้วยภาพประกอบ 2.27



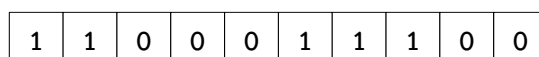


ภาพประกอบ 2.27 ขั้นตอนการทำงานของ GA

จากกระบวนการข้างต้นนั้นพบว่า GA มีสิ่งจำเป็นที่จะต้องออกแบบเพื่อนำ GA มาใช้งานได้แก่ การเข้ารหัสโครโมโซม กระบวนการทางพันธุกรรม การคำนวณค่าความเหมาะสม การคัดเลือก (Selection) และการแทนที่ (Replacement) ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานของแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

2.5.2.1 การเข้ารหัสโครโมโซม (Chromosome coding)

จะเริ่มต้นด้วยการสุ่มค่าของคำตอบซึ่งจะเป็นค่าที่อยู่ในขอบเขตของคำตอบที่ได้กำหนดไว้ โดยจะสุ่มขึ้นมาตามจำนวนของประชากรที่กำหนดแล้วจะทำการเข้ารหัส (Encoding) ของคำตอบนั้นให้เปลี่ยนเป็นโครโมโซม โครโมโซมแต่ละตัวจะเป็นการเรียงตัวกันของยีน ซึ่งรูปแบบของการเข้ารหัสนั้นอาจจะเป็นเลขฐานสอง (Binary bit) แต่ในโดยทั่วไปแล้วนั้น GA จะให้โครโมโซมอยู่ในรูปแบบแปรแบบสตริง (String of variable) ตัวอย่างการเข้ารหัสโครโมโซมแสดงได้ดังภาพประกอบ 2.38



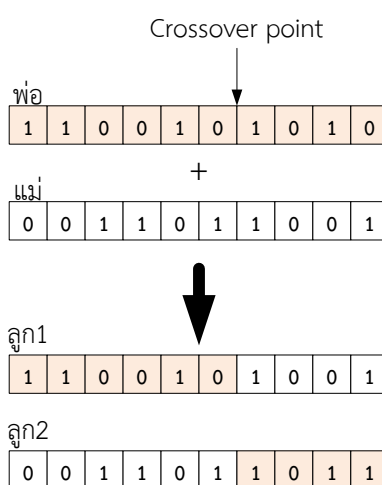
ภาพประกอบ 2.28 การเข้ารหัสโครโมโซมแบบเลขฐานสอง (อภิรักษ์ ชัดวิลาศ, 2011)

2.5.2.2 กระบวนการทางพันธุกรรม (Genetic operation)



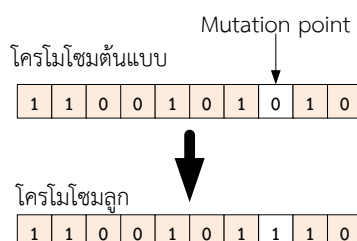
กระบวนการทางพันธุกรรมจะมีกระบวนการในขั้นตอนนี้ 2 กระบวนการด้วยกันคือ

1. การข้ามสายพันธุ์ (Crossover) ซึ่งในการข้ามสายพันธุ์นั้นจะเป็นการสุ่มโครโมโซมมาจำนวน 2 ตัวเพื่อให้เป็นต้นกำเนิดของสายพันธุ์ จากนั้นต้นกำเนิดสายพันธุ์ทั้ง 2 จะทำการแลกเปลี่ยนยีน ซึ่งจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนยีนในโครโมโซม โดยปกติทั่วไปแล้วจะมีการกำหนดอัตราการข้ามสายพันธุ์เอาไว้ ส่วนใหญ่จะใช้ความน่าจะเป็น (Pc) เป็นตัวกำหนดอัตราดังกล่าว การข้ามสายพันธุ์แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.29



ภาพประกอบ 2.29 การข้ามสายพันธุ์แบบจุดเดียว (อภีรักษ์ ชัดวิลาศ, 2011)

2. การกลายพันธุ์ (Mutation) ในกระบวนการนี้จะสุ่มโครโมโซมขึ้นมาหนึ่งค่า แล้วทำการสุ่มเปลี่ยนค่าของยีน ซึ่งจะทำให้ได้โครโมโซมใหม่ขึ้นมาอีกหนึ่งโครโมโซม ปกติแล้วการทำมิวเทชันจะมีอัตราการใช้งานที่ค่อนข้างต่ำ หรือสามารถกล่าวได้ว่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันมีค่าน้อย ถ้ามิวเทชันคือการเปลี่ยนแปลงยีนในโครโมโซมแล้ว ในทางปฏิบัติยีนของโครโมโซมก็คือบิตในระบบตัวเลขของคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.30



ภาพประกอบ 2.30 การกลายพันธุ์แบบจุดเดียว (อภีรักษ์ ชัดวิลาศ, 2011)



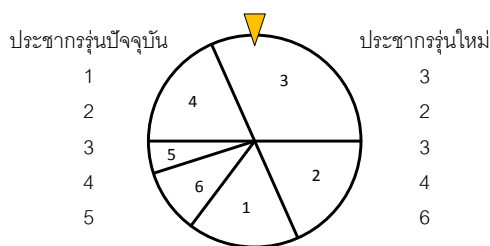
2.5.2.3 การคำนวณค่าความเหมาะสม (Fitness computation)

หลังจากที่โครโมโซมได้ผ่านกระบวนการก่อนหน้ามาแล้ว โครโมโซมทั้งหมดที่ได้จะถูกทำการประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness value) ของโอกาสที่จะอยู่รอดของโครโมโซมนั้นๆ (Probability of selection) ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) เป็นเกณฑ์ในการวัดค่าการอยู่รอดหรือเหมาะสมของโครโมโซม ในกรณีที่ระบบเป็นปัญหาของการค้นหาค่าน้อยที่สุด (Minimization problem) โครโมโซมที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดของระบบจะมีค่าตัวเลขจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุด ตัวอย่างของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้แก่ฟังก์ชันทั่วๆไปที่ใช้คำนวณค่าความผิดพลาดของระบบ (Error) เช่น MSE (Mean-squared error) SSE (Sum-squared error) หรือ RMSE (Root-mean-squared error) เป็นต้น ดังนั้นวัตถุประสงค์ของระบบดังกล่าวก็คือต้องการให้ค่าความผิดพลาดของระบบมีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้นอกเหนือจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว ยังมีฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสม (Fitness function) ที่ทำการจับคู่ค่าการประเมินที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไปเป็นค่าความเหมาะสม จุดประสงค์ของฟังก์ชันนี้ก็คือเพื่อทำการกำหนดค่าความเหมาะสมให้กับโครโมโซมแต่ละตัว โดยทำการเปรียบเทียบกันเองภายในกลุ่มประชากร ค่าความเหมาะสมเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นมาตรฐานวัด เพื่อตัดสินใจคัดเลือกโครโมโซมที่จะใช้ในการสืบสายพันธุ์ในรุ่นถัดไป สาเหตุที่ GA ไม่ใช้ค่าการประเมินในการคัดเลือกโครโมโซม ก็เพราะว่าค่าการประเมินที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับระบบ จึงทำให้ตัวเลขที่ได้มีความหลากหลายและแตกต่างกันมากเกินไป

2.5.2.4 ขั้นตอนการเลือก (Selection)

กระบวนการคัดเลือกของ GA จะทำการพิจารณาจากค่าความเหมาะสมในการอยู่รอด นั่นก็คือหากโครโมโซมใดที่มีค่าความเหมาะสมในการอยู่รอดสูงก็จะมีโอกาสที่จะถูกเลือกให้เป็นประชากรในรุ่นต่อไปก็จะมีโอกาสสูงตามด้วย วิธีการการเลือกโครโมโซมเพื่อนำไปเป็นประชากรในรุ่นต่อไปมีหลายวิธีเช่น การเลือกแบบแบ่งเป็นช่วง (Truncation selection) การเลือกแบบแข่งขัน (Tournament selection) และการเลือกแบบวงล้อเสี่ยงทาย (Roulette wheel selection) ทั้งสามวิธีนั้นวิธีการคัดเลือกด้วยวงล้อเสี่ยงทายเป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุด (อภิรักษ์ ชัดวิลาส, 2011) ซึ่งวิธีการนี้แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.31 ที่พื้นที่ในวงล้อเสี่ยงทายจะถูกแบ่งโดยค่าความเหมาะสม และจะทำการเลือกประชากรรุ่นใหม่ พบว่า โครโมโซมตัวที่ 3 ถูกเลือก 2 ครั้ง แต่โครโมโซมตัวที่ 5 ไม่ถูกเลือกเลย เนื่องจากค่าความเหมาะสมในการอยู่รอดมีค่าต่ำ





ภาพประกอบ 2.31 วิธีการคัดเลือกแบบวงล้อเสี่ยงทาย (อภีรักษ์ ชัดวิลาศ, 2011)

2.5.2.5 การแทนที่ (Replacement)

การแทนที่เป็นขั้นตอนหลังจากที่ GA ได้โครโมโซมลูกหลานเรียบร้อยแล้ว และจะนำโครโมโซมลูกหลานใหม่นี้ ไปแทนที่ประชากรรุ่นเก่า การนำโครโมโซมลูกหลานมาแทนที่ประชากรรุ่นก่อน จะทำให้ประชากรรุ่นใหม่ประกอบไปด้วยโครโมโซมใหม่ๆ ซึ่งเป็นโครโมโซมที่ดีกว่าเพราะได้สืบสายพันธุ์ที่ดีจากต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกแล้ว กลยุทธ์ในการคัดเลือกกว่าโครโมโซมไหนจะถูกแทนที่นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ

1. การแทนที่ประชากรทั้งรุ่น (Generational GA) เป็นการนำประชากรลูกหลานแทนที่ประชากรเก่าทั้งหมด ดังนั้นถ้าในระบบหนึ่งมีประชากรขนาด จำนวนของโครโมโซมที่จะมาแทนที่จะต้องมีขนาด เช่นกัน วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายเนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนของการคัดเลือกว่าประชากรส่วนใหญ่จะถูกแทนที่ แต่การที่ไม่มีขั้นตอนดังกล่าวกลายเป็นข้อเสีย นั่นคือ โครโมโซมที่ดีในรุ่นก่อนจะถูกแทนที่ไปด้วยวิธีแก้อย่างง่ายๆ คือ ก่อนที่จะทำการแทนที่ให้คัดเลือกเก็บโครโมโซมที่ดีที่สุด 2-3 ตัวแรก เอาไว้โดยอาจจะใช้วิธีการคัดเลือกดังที่อธิบายมาแล้วก่อนหน้านี้ วิธีดังกล่าวอาจเรียกได้ว่าเป็นกลยุทธ์คัดเลือกหัวกระทิ (Elitist strategy) อย่างไรก็ตาม ประชากรที่เหลืออยู่อาจจะถูกครอบงำด้วยโครโมโซมหั้วกระทินี้ได้โดยง่าย กล่าวคือถ้าไม่มีโครโมโซมใหม่ที่ดีกว่าเกิดขึ้น โครโมโซมที่ดีที่สุดจากรุ่นก่อนก็จะถูกเก็บไว้อยู่ตลอดไปและไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ขึ้น ทำให้ GA ไม่สามารถสร้างวิวัฒนาการโครโมโซมใหม่ๆ ขึ้นมาได้ ถึงแม้ว่าผลของโครโมโซมหั้วกระทิจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้ แต่วิธีนี้ก็ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าทำให้ระบบโดยรวมดีขึ้น

2. การแทนที่ประชากรแบบคงตัว (Steady-state GA) เป็นการนำเอาประชากรลูกหลานไปแทนที่ประชากรเดิมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจะต้องมีการคัดเลือกประชากรที่จะถูกแทนที่ ซึ่งโดยปกติจะพิจารณาจากค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้นเอง โครโมโซมเก่าจะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมใหม่เพียง 1 หรือ 2 ตัวเท่านั้น กลวิธีในการแทนที่มีอยู่หลายวิธี เช่นการแทนที่ประชากรที่ด้อยที่สุดหรือการแทนที่ประชากรโดยการสุ่มเลือกเป็นต้น (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

ดังนั้น GA เป็นวิธีการค้นหาคำตอบ ที่มีพื้นฐานมาจากกระบวนการคัดเลือกตามธรรมชาติ และกระบวนการคัดเลือกทางพันธุศาสตร์ โดยถือว่าเป็นวิธีการหาคำตอบที่มีวิวัฒนาการอยู่



ในขั้นตอนการทำงานของตัวเอง ซึ่งเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพการทำงานในปัจจุบัน และได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และงานทางด้านปัญหาประดิษฐ์ต่างๆ ซึ่งในการรักษาระดับแรงดันที่โหลดนั้น ได้ทำการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการควบคุม PI ที่มีความจำเป็นที่ต้องหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม การใช้ GA เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI นั้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ถูกติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแบบสถิตย์ (Static VAR compensator) ก็ได้้นำกระบวนการของ GA เพื่อใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวด้วย (Wang, *et al*, 2000)

สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอถึงบทความต่างๆที่ได้กล่าวถึงดี-สแตตคอม หลักการทำงานของดี-สแตตคอมได้แนวความคิดจากการแปลงผันของแหล่งจ่ายกระแสหรือแหล่งจ่ายแรงดัน สำหรับการใช้ในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า โดย VSC มีโครงสร้างทั่วไปแบบบริจท์ และโครงสร้างพื้นฐานของวงจรแปลงผันที่ใช้คือ แบบเฟสเดียวเฮสบริจท์ แบบ 3 เฟส 3 สาย แบบ 3 เฟส 4 สาย เป็นต้น ในด้านประสิทธิภาพการทำงานของดี-สแตตคอม ในการรักษาคุณภาพของกำลังไฟฟ้านั้น เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ CPDs ประเภทอื่น ดี-สแตตคอมสามารถใช้แก้ปัญหาต่างๆของคุณภาพกำลังไฟฟ้าได้เกือบทุกปัญหา ส่วนกลยุทธ์ในการควบคุมจากงานวิจัยส่วนใหญ่ จะใช้การควบคุมแบบ PI ที่อยู่บนกรอบอ้างอิง dq ทำให้ต้องมีชุด PLL ต่อร่วมในระบบด้วย จึงทำให้การออกแบบระบบควบคุมมีความซับซ้อนมากขึ้น เพื่อให้ดี-สแตตคอมมีการออกแบบระบบควบคุมที่ง่ายขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการควบคุมกระแสแบบฮิเตอร์รีซิส และใช้การค้นหาที่เหมาะสมของการควบคุมแรงดันกระแสกลับด้วยวิธี GA ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป



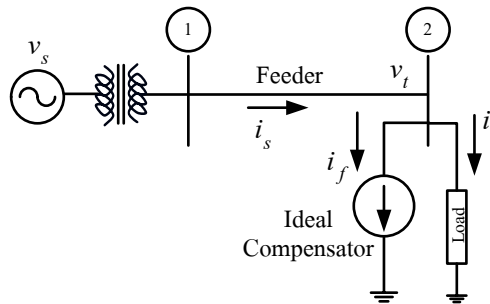
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

สแตตคอมระบบจำหน่าย หรือ ดี-สแตตคอมเป็นอุปกรณ์หนึ่งในตระกูลอุปกรณ์คัสทอมพาวเวอร์ ซึ่งจะต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า เมื่อเชื่อมต่อกับโหลดดี-สแตตคอมถูกใช้เป็นตัวชดเชยให้กับโหลด เช่นการปรับปรุงตัวประกอบไฟฟ้า การกรองฮาร์มอนิกและการปรับสมดุลโหลด เมื่อระบบได้ทำการติดตั้งดี-สแตตคอมแล้ว ดี-สแตตคอมทำหน้าที่กลายเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ปรับค่าได้ ที่จะรับหรือจ่ายกำลังรีแอกทีฟนอกจากนี้ดี-สแตตคอม ยังสามารถรักษาระดับแรงดันที่บัสเชื่อมต่อได้อีกด้วย โครงสร้างของดี-สแตตคอมนั้น จะประกอบไปด้วยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเก็บประจุเชื่อมโยง วงจรกรองและชุดควบคุม ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 แบบจำลองของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

แบบจำลองของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า จะมีโหลดต่อรวมอยู่ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยมีอุปกรณ์ดี-สแตตคอมต่อขนานกับโหลด ซึ่งแบบจำลองแสดงได้ดังภาพประกอบ 3.1



ภาพประกอบ 3.1 ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งดี-สแตตคอม

จากภาพประกอบ 3.1 หากดี-สแตตคอมทำหน้าที่เป็นตัวชดเชยให้กับโหลด จะแทนด้วยแหล่งจ่ายอุดมคติ i_f ที่ต่อขนานกับโหลดบัสที่ 2 ถ้ากำหนดให้โหลดที่บัส 2 เป็นรีแอกทีฟโหลดมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นและไม่สมดุล ในขณะที่ไม่มีการติดตั้งดี-สแตตคอมกระแส i_s ที่ไหลผ่านสายป้อนจะมีลักษณะไม่สมดุลและผิดเพี้ยนตามกระแสของโหลด ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันที่บัสไม่สมดุลและเกิดการผิดเพี้ยนไปด้วย ดังนั้นเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นดี-สแตตคอมจะต้องฉีกกระแสเข้าไปสู่ระบบ เพื่อทำการชดเชยให้ค่ากระแส i_s นั้นกลับมาเป็นกระแสมูลฐานและเป็นลำดับบวกตามเดิมได้ นอกจากนี้ดี-สแตต

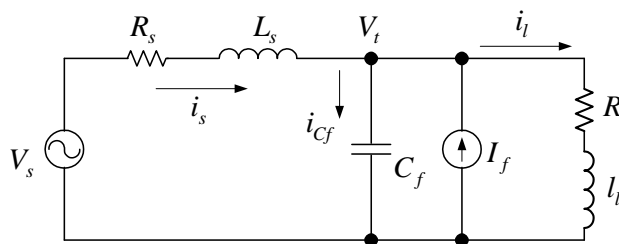


คอมสามารถบังคับให้กระแส i_s มีเฟสตรงกันกับแรงดันที่บัส 2 ได้อีกด้วย หากพิจารณาจากภาพประกอบ 3.1 จะสามารถเขียนสมการของกระแสโดยใช้ KCL ดังนี้

$$i_s + i_f = i_l \Rightarrow i_s = i_l - i_f \quad (3.1)$$

จากสมการ (3.1) พบว่าลักษณะการชดเชยของดี-สแตตคอมคือ การฉีดกระแส i_f ที่ถูกสร้างขึ้นไปทำการหักล้างกับส่วนประกอบรีแอกทีฟ ฮาร์มอนิก และความไม่สมดุลของกระแสไหลด้นเอง

หากต้องการให้ดี-สแตตคอมทำการรักษาแรงดันไฟฟ้าที่บัส ดี-สแตตคอมจะทำงานคล้ายเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ปรับค่าได้ทำการฉีดกระแสเข้าไปในระบบ เพื่อให้แรงดันที่โหลดบัสมีค่าตามที่กำหนด ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้ในสภาวะคงตัวนี้ ดี-สแตตคอมจะไม่มี การจ่ายหรือดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจริงให้กับระบบที่เชื่อมต่อ ดังแสดงได้ในภาพประกอบ 3.2



ภาพประกอบ 3.2 วงจรสมมูลของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งดี-สแตตคอม

จากภาพประกอบ 3.2 โดยแบบจำลองของระบบนั้นประกอบด้วยบัสอนันต์ (Infinite bus) ระบบจะมีค่าอิมพีแดนซ์ได้แก่ R_s และ L_s ในส่วนแบบจำลองของดี-สแตตคอมนั้น จะแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ i_f ที่จะต่อร่วมกับตัวเก็บประจุ C_f มีหน้าที่สำหรับกรองฮาร์มอนิกหรือเป็นตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับโหลด ทั้งนี้ระยะเวลาการชดเชยแรงดันนั้นไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเก็บประจุ ในส่วนสุดท้ายแบบจำลองของโหลดประกอบด้วยโหลดชนิด RL ที่เป็นระบบสามเฟสสมดุลจากภาพประกอบ 3.2 เขียนสมการเขียนสมการของแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

$$V_{s,abc} = V_{R_s,abc} + V_{L_s,abc} + V_{t,abc} \quad (3.2)$$

$$V_{s,abc} = R_s i_{s,abc} + L_s \frac{di_{s,abc}}{dt} + V_{t,abc} \quad (3.3)$$

$$L_s \frac{di_s}{dt} = V_{s,abc} - V_{t,abc} - R_s I_{s,abc} \quad (3.4)$$



$$i_s + i_f = i_{cf} + i_l \quad (3.5)$$

$$i_s + i_f - i_l = i_{cf} \quad (3.6)$$

$$C \frac{dV_{t,abc}}{dt} = i_{s,abc} + i_{f,abc} - i_{l,abc} \quad (3.7)$$

โดย ซับสคริป abc หมายถึงปริมาณกระแสหรือแรงดันในแต่ละเฟส และแรงดันไฟฟ้าที่จุด V_t สามารถหาได้ดังสมการที่ (3.8) – (3.9)

$$V_t = V_{R_l} + V_{L_l} \quad (3.8)$$

$$V_{t,abc} = R_l i_{l,abc} + L_l \frac{di_{l,abc}}{dt} \quad (3.9)$$

ดังนั้นจะได้สมการการไหลของกระแสที่ผ่านโหลดตัวเหนี่ยวนำหรือ i_l แสดงดังสมการที่ (3.10)

$$L_l \frac{di_{l,abc}}{dt} = -R_l i_{l,abc} + V_{t,abc} \quad (3.10)$$

เมื่อ $i_{s,abc}$, $i_{f,abc}$, $i_{l,abc}$, $v_{s,abc}$ และ $v_{t,abc}$ เป็นเวกเตอร์ของกระแสและแรงดัน ที่ประกอบด้วยขนาดและมุมเฟส

R_s คือค่าความต้านทานของระบบ

L_s คือค่าความเหนี่ยวนำของระบบ

R_l คือค่าความต้านทานของโหลด

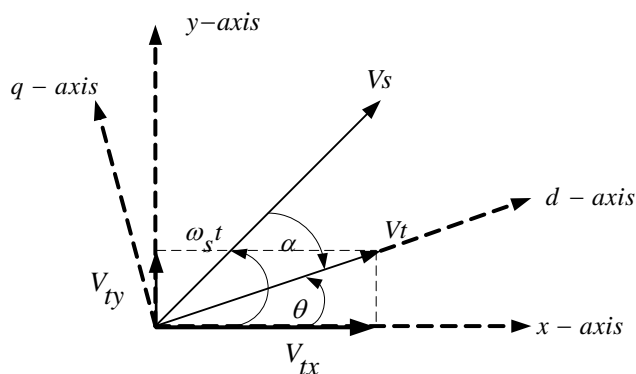
L_l คือค่าความเหนี่ยวนำของโหลด

abc คือซับสคริปของกระแสและแรงดันในแต่ละเฟส

จากตัวแปรที่ปรากฏในภาพประกอบ 3.2 โดย R_l และ L_l เป็นค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำของโหลด ตัวแปร R_s และ L_s คือความต้านทานและความเหนี่ยวนำของระบบ และ C_f คือตัวเก็บประจุที่จุดเชื่อมต่อ เมื่อกำหนดให้ระบบที่พิจารณาเป็นระบบสามเฟสแบบสมดุล จากสมการของระบบที่กล่าวมานั้น จะถูกแปลงสมการเพื่อให้อยู่ในกรอบอ้างอิง dq ซึ่งมีหลักการที่คล้ายกับ



การวางกรอบของสนามแม่เหล็ก (Field-oriented control) ในเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟส หลักการแปลงค่าจากกรอบอ้างอิง abc ให้อยู่ในรูปกรอบอ้างอิง dq นั้นแสดงได้ดังภาพประกอบ 3.3



ภาพประกอบ 3.3 การวางแนวของกรอบอ้างอิง (Kittaya *et al*, 2011)

จากภาพประกอบ 3.3 มุม θ เป็นมุมของแรงดันที่ไหลดบัสเทียบกับแกนอ้างอิง x สามารถหาได้จากสมการ

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_{ty}}{V_{tx}} \right) \quad (3.11)$$

เมื่อกำหนดให้แรงดันที่ไหลดบัสเป็นแรงดันอ้างอิง โดยมีขนาดเฉพาะในแกน d (V_{id}) นั้นหมายความว่า

$$v_{iq} \equiv 0 \quad (3.12)$$

และส่งผลให้

$$\frac{dv_{iq}}{dt} = 0 \quad (3.13)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (3.4) (3.7) และ (3.10) จากการวางแนวกรอบอ้างอิงดังภาพประกอบ 3.3 ทำให้สามารถแปลงสัญญาณจากกรอบอ้างอิง abc เป็นสัญญาณอ้างอิงบนกรอบ dq ได้ดังนี้

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{V_s}{L_s} \cos \alpha - \frac{1}{T_s} i_{sd} - \frac{1}{L_s} v_{id} + \omega i_{sq} \quad (3.14)$$



$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{V_s}{L_s} \sin \alpha - \frac{1}{T_s} i_{sq} - \omega i_{sd} \quad (3.15)$$

$$\frac{dv_{td}}{dt} = \frac{1}{C_f} i_{fd} + \frac{1}{C_f} i_{sd} - \frac{1}{C_f} i_{ld} \quad (3.16)$$

$$\frac{di_{ld}}{dt} = \frac{1}{L_l} v_{td} - \frac{1}{T_l} i_{ld} + \omega i_{lq} \quad (3.17)$$

$$\frac{di_{lq}}{dt} = -\frac{1}{T_l} i_{lq} - \omega i_{ld} \quad (3.18)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega - \omega_s \quad (3.19)$$

$$\omega = \frac{i_{fq} + i_{sq} - i_{lq}}{C_f v_{td}} \quad (3.20)$$

เมื่อ T_s เป็นค่าคงที่ของเวลาด้านสายป้อน หาได้โดย $T_s = \frac{L_s}{R_s}$

T_l เป็นค่าคงที่ของเวลาด้านโหลด หาได้โดย $T_l = \frac{L_l}{R_l}$

3.2 การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัล

จากสมการแบบจำลองของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่ได้นำเสนอมานั้น พบว่าสมการของระบบไม่เป็นสมการเชิงเส้น จึงทำให้ประสบปัญหาในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัล ดังนั้นจึงต้องแก้ปัญหาดังกล่าวด้วย วิธีการแปลงสมการที่ไม่เป็นสมการเชิงเส้นให้เป็นสมการเชิงเส้น โดยกระบวนการดังนี้พิจารณาสมการของระบบดังสมการที่ (3.14) – (3.19) ในรูปแบบดังสมการที่ (3.21)

$$\dot{x} = f(x, u, t) ; x(0) = x_0 \quad (3.21)$$

โดยที่ $f(x, u, t)$ คือ เวกเตอร์ของฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้น
 $x(t) \in \mathfrak{R}^n$ คือ เวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ (State variables)
 $u(t) \in \mathfrak{R}^m$ คือ เวกเตอร์อินพุต



x_0 คือ สภาวะคงตัวที่จุดทำงานใดๆ

ในสภาวะปกติระบบจะคงตัวทำงานตามอินพุตที่ $u_0 = u(0)$ บ้อนเข้ามาด้วยสภาวะคงตัว x_0 ซึ่งในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุต $\Delta u(t)$ เพียงเล็กน้อย การบ้อนสัญญาณอินพุต u ให้กับระบบในสภาวะคงตัวที่จุดทำงานใดๆ x_0 เป็นไปตามสมการที่ (3.22) และสมการ (3.23) ตามลำดับ

$$x(t) = x_0 + \Delta x(t) \quad (3.22)$$

$$u(t) = u_0 + \Delta u(t) \quad (3.23)$$

เมื่อ $\Delta x(t)$ คือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร x ทำให้ได้ว่า

$$\dot{x}(t) + \Delta \dot{x}(t) = f((x_0 + \Delta x_0(t), u_0 + \Delta u_0(t), t_0 + \Delta t) \quad (3.24)$$

จากสมการที่ (3.24) เมื่อใช้การกระจายด้วยการกระจายพจน์ของอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor's series) จะได้ดังสมการที่ (3.25)

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) + \Delta \dot{x}(t) = f(x_0, u_0) + \left\{ \frac{\partial f}{\partial x}(x_0, u_0) \right\} \Delta x(t) + \left\{ \frac{\partial f}{\partial u}(x_0, u_0) \right\} \Delta u(t) \\ + \text{high order terms} \end{aligned} \quad (3.25)$$

จากสมการที่ (3.25) การเปลี่ยนแปลงของสมการที่มีอันดับสูงมีน้อยมาก ทำให้สามารถละทิ้งไป ดังนั้นเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ได้เป็น

$$\Delta \dot{x}(t) = \left\{ \frac{\partial f}{\partial x}(x_0, u_0) \right\} \Delta x(t) + \left\{ \frac{\partial f}{\partial u}(x_0, u_0) \right\} \Delta u(t) \quad (3.26)$$

จากสมการ (3.26) สามารถหาเมตริกสัมประสิทธิ์ของตัวแปรสถานะและสัมประสิทธิ์ของอินพุตได้ดังนี้

$$A_0 = \frac{\partial f}{\partial x}(x_0, u_0) \quad (3.27)$$



$$B_0 = \frac{\partial f}{\partial u}(x_0, u_0) \quad (3.28)$$

ดังนั้นจะได้สมการเชิงเส้นของระบบในรูปตัวแปรสถานะคือ

$$\Delta \dot{x}(t) = A_0 \Delta x(t) + B_0 \Delta u(t) \quad (3.29)$$

จากสมการที่ (3.14)-(3.19) ซึ่งเป็นสมการของระบบจำหน่ายที่ติดตั้งดี-สแตตคอมในอุดมคติที่ไม่เป็นสมการเชิงเส้น ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัส จะต้องได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการทำให้สมการของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น (Linearization) ดังนั้นจากสมการที่ (3.14) ถึง สมการที่ (3.19) นำมาแทนค่าตัวแปรสถานะตามรูปแบบของสมการ (3.29) จะได้ตัวแปรสถานะดังสมการที่ (3.30) และได้ตัวแปรอินพุตของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัสดังสมการที่ (3.31) ตามลำดับ

$$\Delta x = \begin{bmatrix} \Delta i_{sd} \\ \Delta i_{sq} \\ \Delta v_{td} \\ \Delta i_{ld} \\ \Delta i_{lq} \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$\Delta u = \begin{bmatrix} \Delta i_{fd} \\ \Delta i_{fq} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

จากสมการของระบบในสมการที่ (3.14)-(3.19) สามารถหาสัมประสิทธิ์ของเมตริก A_0 และ B_0 ได้ดังสมการที่ (3.32) และ สมการ (3.33) ตามลำดับ



$$A_0 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_s} \left(\omega_0 + \frac{k_{isq}}{C_f} \right) & -\left(\omega_0 \frac{k_{isq}}{C_f} + \frac{1}{L_s} \right) & 0 & -\frac{k_{isq}}{C_f} & -\frac{k_{vsin}}{L_s} \\ -\omega_0 & -\left(\frac{1}{T_s} + \frac{k_{isd}}{C_f} \right) & -\omega_0 k_{isd} & 0 & \frac{k_{isd}}{C_f} & -\frac{k_{vcos}}{L_s} \\ \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & -\frac{1}{C_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_{ilq}}{C_f} & -\omega_0 k_{ilq} + \frac{1}{L_l} & -\frac{1}{T_l} \left(\omega_0 - \frac{k_{ilq}}{C_f} \right) & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_{ild}}{C_f} & \omega_0 k_{ild} & -\omega_0 & -\frac{1}{T_l} + \frac{k_{ild}}{C_f} & 0 \\ 0 & \frac{k_{vtd}}{C_f} & -\omega_0 k_{vtd} & 0 & -\frac{k_{vtd}}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{k_{isq}}{C_f} \\ 0 & -\frac{k_{isd}}{C_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \\ 0 & \frac{k_{ilq}}{C_f} \\ 0 & -\frac{k_{ild}}{C_f} \\ 0 & \frac{k_{vtd}}{C_f} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

โดยที่ $\omega_0 = \left(\frac{i_{sq0} + i_{fq0} - i_{lq0}}{C_f v_{td0}} \right)$

$$k_{isq} = \frac{i_{sq0}}{v_{td0}}$$



$$k_{v\sin} = V_{s0} \sin \alpha_0$$

$$k_{isd} = \frac{i_{sd0}}{v_{id0}}$$

$$k_{v\cos} = V_{s0} \cos \alpha_0$$

$$k_{ilq} = \frac{i_{lq0}}{v_{id0}}$$

$$k_{ild} = \frac{i_{ld0}}{v_{id0}}$$

$$k_{vid} = \frac{1}{v_{id0}}$$

เมื่อกำหนดให้เอาต์พุตของระบบคือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Δv_{id}) ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการเอาต์พุตของระบบได้ดังนี้

$$y(t) = C\Delta\dot{x}(t) + D\Delta u(t) \quad (3.34)$$

โดยที่ $C = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$ (3.35)

และ $D = [0]$ (3.36)

ดังนั้นจึงสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัสได้ดังสมการต่อไปนี้

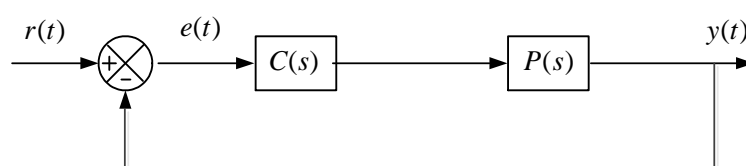
$$Y(s) = C(sI - A_0)^{-1} B_0 U(s) + C(sI - A_0)^{-1} x(0) \quad (3.37)$$

โดยที่ I คือเมทริกหนึ่งหน่วย

3.3 การออกแบบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวิธีการดั้งเดิม



การออกแบบระบบควบคุมแรงดันที่โหลด v_{ld} จะเลือกค่ากระแสรีแอกทีฟ i_{fq} เป็นสัญญาณอินพุตให้กับระบบซึ่งใช้วิธีการหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ 1 อินพุต 1 เอาต์พุต (Single input single output; SISO) (Barratt and Boyd, 1992; Kittaya, 2012) ในงานวิจัยนี้ใช้หลักการออกแบบด้วยวิธีการโบทพอด (Bode plot) ซึ่งเป็นวิธีการพื้นฐานดั้งเดิมเพื่อใช้ในการออกแบบการควบคุมแรงดันกระแสสลับที่โหลดบัส โครงสร้างของรูปแบบการหาฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยวิธีการ SISO แสดงได้ดังภาพประกอบ 3.4



ภาพประกอบ 3.4 โครงสร้างการควบคุมแบบ SISO

โดยที่ $P(s)$ หมายถึงฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัส

$C(s)$ หมายถึงตัวควบคุมของระบบ

$r(t)$ หมายถึงสัญญาณอ้างอิง

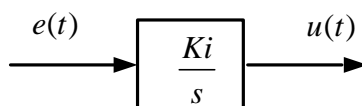
จากสมการที่ (3.14)-(3.19) ที่ได้กล่าวมานั้น เป็นระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่ได้ทำการติดตั้งดี-สแตตคอม การพิจารณาในกรณีนี้ ดี-สแตตคอมจะเป็นแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติ ข้อกำหนดในการเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต้องได้คุณลักษณะของการควบคุมดังนี้

1. ในสภาวะคงตัวค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับ 0
2. ที่ความถี่ต่ำระบบควรมีขนาด (Magnitude) อย่างน้อย 40 dB เพื่อขจัดสัญญาณรบกวน
3. ที่ความถี่สูงระบบควรมีขนาด (Magnitude) ต่ำ เพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่ความถี่สูง
4. เกนมาร์จิ้น (Gain margin) มีค่าไม่น้อยกว่า 6 dB และเฟสมาร์จิ้น (Phase margin) มีค่ามากกว่า 60 deg

เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดข้อ 1 และข้อ 2 จึงมีความจำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมแบบ I นอกจากนี้เพื่อให้ผลการตอบสนองของระบบ ให้เป็นไปตามข้อกำหนดในข้อที่ 3 และ 4 อาจจำเป็นต้องใช้ตัวชดเชยเฟสแบบเฟสนำหน้า (T_{Lead}) และเฟสล้าหลัง (T_{Lag}) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้



เพื่อให้การออกแบบไม่ซับซ้อน ในเบื้องต้นจะใช้ตัวควบคุมแบบโอเพนลูปอย่างเดียว ดังนั้นจะสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมได้ดังภาพประกอบ 3.5



ภาพประกอบ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุม

โดยที่ K_i คือค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ I ในการออกแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ K_i ระบบจำหน่ายมีพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตาราง 3.1 พารามิเตอร์ของระบบจำหน่าย

พารามิเตอร์	ปริมาณ	พารามิเตอร์	ปริมาณ
V_s	22 kV	L_l	1 mH
R_s	1.45644 Ω	C_f	5 μF
L_s	38.666 mH	R_l	116 Ω

จากพารามิเตอร์ของระบบจำหน่ายดังแสดงในตารางที่ 3.1 เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ของระบบลงในสมการที่ (3.31) และสมการที่ (3.32) ด้วยการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ โดยได้ใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อทำการคำนวณหาค่าของตัวแปรสถานะที่จุดทำงานในสภาวะแรงดันตกที่ 0.5 p.u. จะสามารถหาสัมประสิทธิ์ของเมทริก A_0 และ B_0 ดังสมการที่ (3.38) และ (3.39) ตามลำดับ

$$A_0 = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & i_{sd} & i_{sq} & V_{td} & i_{ld} & i_{lq} & x \\ \hline i_{sd} & -37.67 & 9243 & -39.89 & 0 & -8929 & 9.658e^4 \\ \hline i_{sq} & -314.2 & -1762 & 2.708 & 0 & 1724 & -2.676e^5 \\ \hline V_{td} & 2e^5 & 0 & 0 & 2e^5 & 0 & 0 \\ \hline i_{ld} & 0 & -4.67 & 1000 & -1.16e^5 & 318.8 & 0 \\ \hline \end{array} \end{array}$$



i_{lq}	0	-1724	2.708	-314.2	$1.143e^5$	0
x	0	9.091	-0.01428	0	-9.091	0

(3.38)

$$B_0 =$$

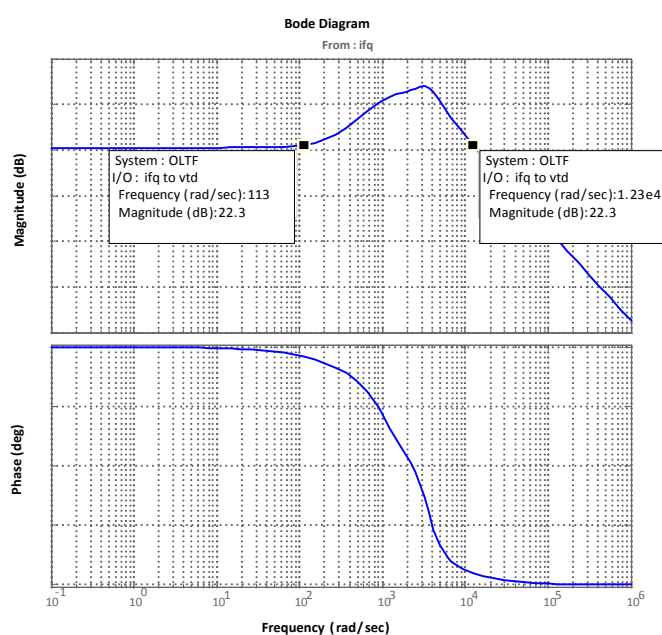
	i_{fd}	i_{fq}
i_{sd}	0	8929
i_{sq}	0	-1762
V_{td}	$2e^5$	0
i_{ld}	0	-4.67
i_{lq}	0	-1724
x	0	9.091

(3.39)

ดังนั้นจะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB โดยมีอินพุตคือ Δi_{fq} และเอาต์พุตคือ Δv_{td} ดังนี้

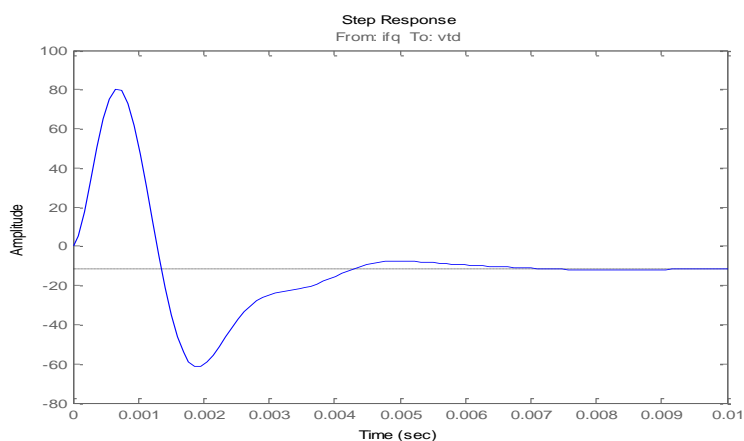
$$\frac{\Delta v_{td}}{\Delta i_{fq}} = \frac{1.787e^9 s^4 + 4.147e^{14} s^3 + 2.406e^{19} s^2 + 1.777e^{21} s - 1.968e^{24}}{s^6 + 2.321e^5 s^5 + 1.389e^{10} s^4 + 5.052e^{13} s^3 + 2.235e^{17} s^2 + 2.586e^{20} s + 1.749e^{23}} \quad (3.40)$$

จากสมการที่ (3.40) เป็นสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัสโดยที่มีอินพุตคือกระแสในแกน q (i_{fq}) และมีเอาต์พุตเป็นแรงดันที่โหลดบัส (v_{td}) เมื่อนำมาหาโบทไดอะแกรม จะแสดงได้ในภาพประกอบ 3.6



ภาพประกอบ 3.6 โบทพอดไดอะแกรม

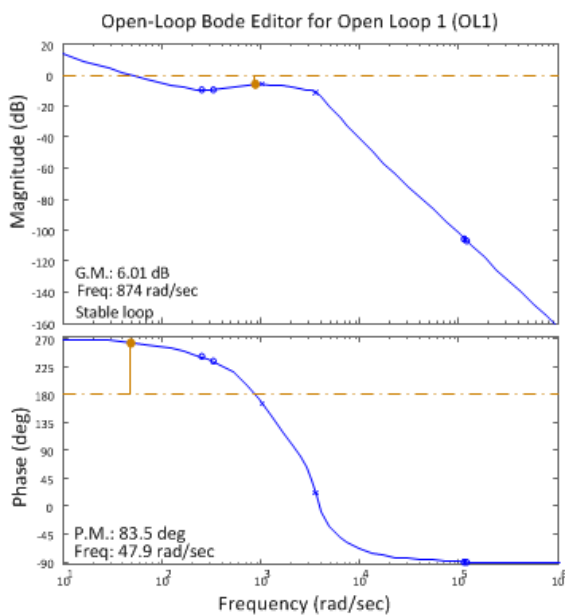
จากภาพประกอบ 3.6 พบว่าในช่วงความถี่ 113 rad/sec ถึง $12.3 \times 10^4 \text{ rad/sec}$ จะเกิดการพุ่งเกิน (Over shoot) ของขนาด (Magnitude) 22.3 dB ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัส ซึ่งระบบแบบนี้มีลักษณะเป็นแบบเฟสไม่ต่ำสุด (Non-minimum phase) โดยจะสอดคล้องกับผลตอบสนองในภาพประกอบ 3.7 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองจะมีการพุ่งเกินในทิศทางตรงข้ามกับคำสั่งอินพุตในช่วงเริ่มต้น แล้วจึงค่อยปรับเข้าสู่ค่าคงตัว ดังนั้นในระบบแบบนี้จึงไม่มีความจำเป็นที่ต้องใช้ตัวควบคุมแบบ P (P controller) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าคงตัวของผลตอบสนองจะมีค่าเป็นลบ (-) จากเหตุผลดังกล่าว ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ I (K_i) จึงต้องมีค่าเป็นลบ (-) ด้วย



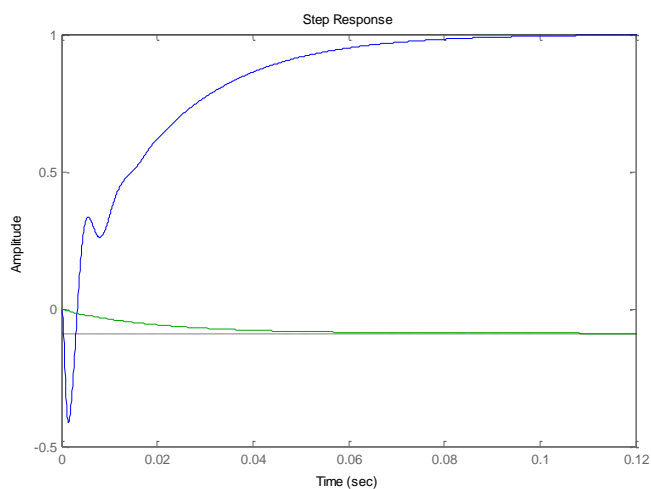
ภาพประกอบ 3.7 ผลการตอบสนองของระบบ

ในภาพประกอบ 3.8 ได้ทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ I (K_i) ด้วยวิธีการ SISO เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด โดยในการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ได้นั้นต้องพิจารณาตามเงื่อนไขของการเลือกค่าพารามิเตอร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว พบว่าเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ K_i ของตัวควบคุมเป็น $K_i = -4.136$ ส่งผลให้ได้ค่าเกนมาร์จิ้น (G.M.) = 6.01 dB และเฟสมาร์จิ้น (P.M.) = 83.5 deg และผลการตอบสนองของระบบที่ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ $K_i = -4.136$ ผลการตอบสนองแสดงได้ดังภาพประกอบ 3.9 จากภาพพบว่าในช่วงเริ่มต้นจะเกิดลักษณะผลตอบสนองแบบพุ่งต่ำ (Undershoot) ในทิศทางตรงกันข้ามกับคำสั่ง จากนั้นจะกลับเข้าสู่ทิศทางปกติของระบบและเข้าสู่ค่าคงตัวได้ภายในเวลา 0.1 sec





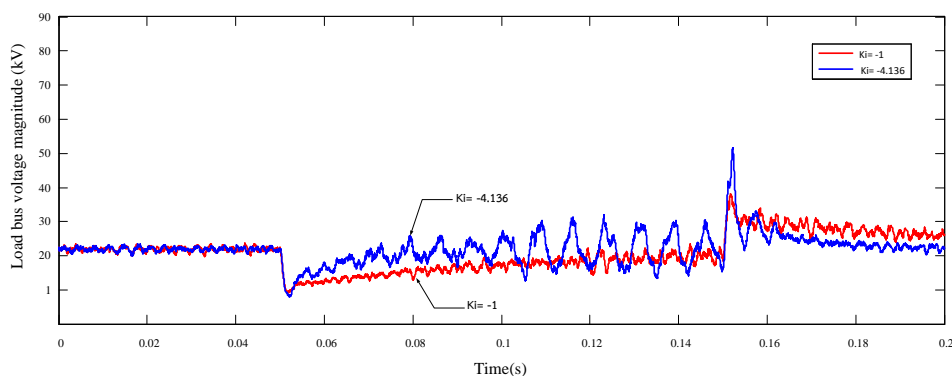
ภาพประกอบ 3.8 โบทพอดไต่อะแกรมของระบบที่ $K_i = -4.136$



ภาพประกอบ 3.9 ผลการตอบสนองของระบบที่ $K_i = -4.136$

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ทำการออกแบบด้วยวิธีการดั้งเดิม มาทำการทดสอบบนโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยการทดสอบกรณีเกิดแรงดันตก 0.5 p.u. ที่เวลา 0.05 sec ถึง 0.15 sec จะได้ผลการทดสอบดังแสดงในภาพประกอบ 3.10 จากภาพประกอบ 3.10 พบว่าค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม K_i ที่ออกแบบนั้น สามารถรักษาระดับแรงดันที่โหลดบัสได้โดยได้เปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ $K_i = -1$ และ $K_i = -4.136$ ดังแสดงในภาพประกอบ



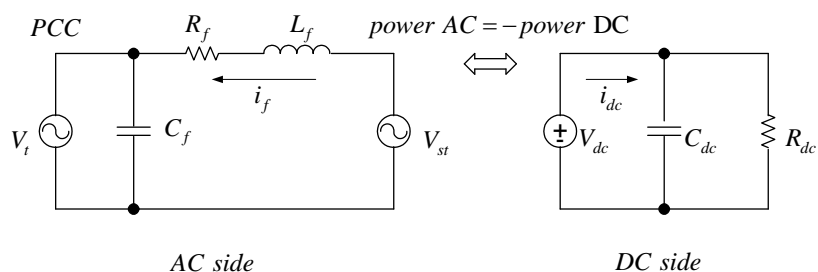


ภาพประกอบ 3.10 การรักษาแรงดันที่โหลดบัสที่แรงดันตก 0.5 p.u. เมื่อ $K_i = -1$ และ $K_i = -4.136$

อย่างไรก็ตามการออกแบบในหัวข้อนี้เป็นการออกแบบตัวควบคุม เมื่อกำหนดให้อุปกรณ์ดี-สแตตคอม เป็นแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติ จึงส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ K_i ที่ได้นั้นอาจจะไม่เหมาะสมกับระบบจริง ดังนั้นในการออกแบบระบบควบคุมที่พิจารณาให้อุปกรณ์ดี-สแตตคอม ทำหน้าที่เป็นวงจรแปลงผันแรงดันจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

3.4 แบบจำลองของดี-สแตตคอมและการควบคุม

เมื่อพิจารณาการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัสโดยใช้อุปกรณ์ดี-สแตตคอม ที่มีทำงานเป็นอุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์ สามารถเขียนวงจรสมมูลของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ดี-สแตตคอมได้ดังภาพประกอบ 3.11 อุปกรณ์ดี-สแตตคอมจะทำหน้าที่คล้ายแหล่งจ่ายกระแสโดยการฉีดกระแส i_f เข้าสู่ระบบเพื่อทำให้แรงดัน v_f มีค่าตามแรงดันอ้างอิง พิจารณาวงจรสมมูลของระบบดังแสดงภาพประกอบ 3.11 จะสามารถหาสมการของระบบได้ดังนี้



ภาพประกอบ 3.11 วงจรสมมูลที่จุด v_f ของดี-สแตตคอม

จากภาพประกอบ 3.11 เมื่อพิจารณาวงจรทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (AC side) สามารถเขียนสมการแรงดันด้วยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ได้ดังนี้

$$V_{st} + V_{Rf} + V_{Lf} = V_t \quad (3.41)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ดังนี้

$$L_f \frac{di_f}{dt} = V_t - V_{st} - i_f R_f \quad (3.42)$$

จากสมการที่ (3.42) เป็นสมการกระแสของดี-สแตดคอม เมื่อพิจารณาในระบบสามเฟสจะได้
ตั้งสมการที่ (3.43)

$$L_f \frac{di_{f,abc}}{dt} = V_{t,abc} - V_{st,abc} - i_{f,abc} R_f \quad (3.43)$$

โดยที่ $V_{st,abc} = S_{abc} k v_{dc}$ คือแรงดันเอาต์พุตของดี-สแตดคอม
 $S_{abc} = S_{abc,up} - S_{abc,low}$ คือสัญญาณการสวิตช์ของแต่ละเฟส
 R_f คือ ความต้านทานแฝงของตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ (Inductor parasitic resistance)
 k คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวงจรแปลงผันและอัตราส่วนของหม้อแปลง

เมื่อพิจารณาวงจรทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้า i_{dc} ประกอบด้วยกระแสที่ไหลผ่าน
ตัวเก็บประจุเชื่อมโยงกระแสตรง i_{Cdc} และกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน i_{Rdc} โดยที่ความต้านทาน
 R_{dc} แทนการสูญเสียในวงจรแปลงผัน หรืออาจกล่าวได้ว่าความต้านทาน R_{dc} และ R_f แทนการ
สูญเสียแฝงในอุปกรณ์ของดี-สแตดคอมนั่นเอง กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นจะมีในส่วนของกำลังไฟฟ้า
กระแสสลับและกำลังไฟฟ้ากระแสตรง โดยกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลเข้าสู่วงจรแปลงผันจะเท่ากับ
กำลังไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรแปลงผัน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Power DC = -Power AC \quad (3.44)$$

โดยที่ $P_{ac} = i_{dc} v_{dc}$ (3.45)

แต่ $i_{dc} = i_{Rdc} + i_{Cdc}$ (3.46)

$$i_{dc} = \frac{v_{dc}}{R_{dc}} + C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} \quad (3.47)$$



จะได้สมการกำลังไฟฟ้ากระแสตรงดังนี้

$$P_{dc} = \left(\frac{v_{dc}}{R_{dc}} + C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} \right) v_{dc} \quad (3.48)$$

และสมการกำลังไฟฟ้ากระแสสลับคือ

$$P_{ac} = v_{st}^T \times i_f \quad (3.49)$$

$$P_{ac} = -[V_{sta} i_{fa} + V_{stb} i_{fb} + V_{stc} i_{fc}] \quad (3.50)$$

นำสมการที่ (3.48) และ (3.50) แทนค่าในสมการที่ (3.44) จะได้

$$\left(\frac{v_{dc}}{R_{dc}} + C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} \right) v_{dc} = -[V_{sta} i_{fa} + V_{stb} i_{fb} + V_{stc} i_{fc}] \quad (3.51)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้

$$\frac{v_{dc}}{R_{dc}} + C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = -\frac{V_{sta} i_{fa}}{v_{dc}} - \frac{V_{stb} i_{fb}}{v_{dc}} - \frac{V_{stc} i_{fc}}{v_{dc}} \quad (3.52)$$

ดังนั้น สมการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้คือ

$$C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = -\frac{v_{dc}}{R_{dc}} - \frac{V_{sta} i_{fa}}{v_{dc}} - \frac{V_{stb} i_{fb}}{v_{dc}} - \frac{V_{stc} i_{fc}}{v_{dc}} \quad (3.53)$$

เมื่อ $V_{st} = Skv_{dc}$

$$\text{ดังนั้น} \quad R_{dc} C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + v_{dc} = -R_{dc} \left(\frac{S_a k v_{dc}}{v_{dc}} i_{fa} + \frac{S_b k v_{dc}}{v_{dc}} i_{fb} + \frac{S_c k v_{dc}}{v_{dc}} i_{fc} \right) \quad (3.54)$$

$$R_{dc} C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + v_{dc} = -R_{dc} k (S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc}) \quad (3.55)$$

กำหนดให้

$$-i_{fmd}^* = -R_{dc} k (S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc})$$



ดังนั้น
$$R_{dc} C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + v_{dc} = -i_{fmd}^* \quad (3.56)$$

จากสมการที่ (3.56) เมื่อทำการแปลงลาปลาซทรานส์ฟอร์มแล้วจะได้สมการแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงของดี-สแตตคอมดังนี้

$$L\{R_{dc} C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + v_{dc} = -i_{fmd}^*\} \quad (3.57)$$

$$R_{dc} C_{dc} s v_{dc} + v_{dc} = -i_{fmd}^* \quad (3.58)$$

$$v_{dc} (R_{dc} C_{dc} s + 1) = -i_{fmd}^* \quad (3.59)$$

ซึ่ง $R_{dc} C_{dc} = T_{dc}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$v_{dc} (T_{dc} s + 1) = -i_{fmd}^* \quad (3.60)$$

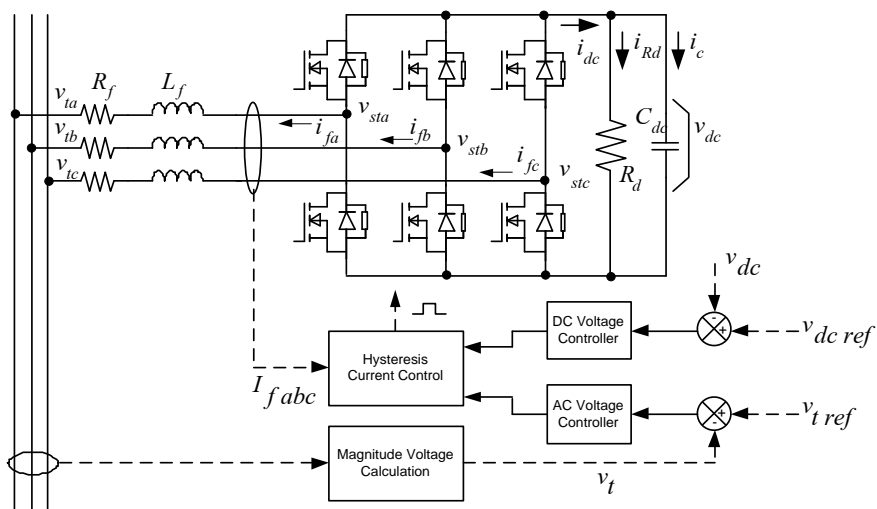
เพราะฉะนั้น

$$v_{dc} = \frac{-i_{fmd}^*}{(T_{dc} s + 1)} \quad (3.61)$$

โดยที่ $T_{dc} = R_{dc} C_{dc}$

ดี-สแตตคอมจะประกอบไปด้วยวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า ตัวเก็บประจุเชื่อมโยง กำลังไฟฟ้ากระแสตรง โครงสร้างของดี-สแตตคอมเมื่อต่อร่วมกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า แสดงได้ใน ภาพประกอบ 3.12 ซึ่งจะประกอบด้วยวงจรแปลงผันแรงดัน ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง ตัวเก็บประจุ เชื่อมโยงกระแสตรงและระบบควบคุม





ภาพประกอบ 3.12 โครงสร้างของดี-สแตตคอมและการควบคุม

3.4.1 ชุดควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซีซของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม

การควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซีซของดี-สแตตคอมคือ การนำกระแสที่ได้จากดี-สแตตคอมทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ที่เป็นผลจากเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้า 2 ส่วนคือ แรงดันหนึ่งหน่วย (Unit voltage) และแรงดันตั้งฉาก (Quadrature voltage) คำนวณได้ดังสมการที่ (3.62) และ (3.63)

$$\begin{aligned}
 u_{ta} &= \frac{v_{ta}}{v_t} \\
 u_{tb} &= \frac{v_{tb}}{v_t} \\
 u_{tc} &= \frac{v_{tc}}{v_t}
 \end{aligned} \tag{3.62}$$

โดยที่ $v_t = \sqrt{v_{ta}^2 + v_{tb}^2 + v_{tc}^2}$

องค์ประกอบแรงดันตั้งฉาก (w_{ta} , w_{tb} และ w_{tc}) ที่ได้จากการแปลงเวกเตอร์อินเฟส (u_{ta} , u_{tb} และ u_{tc}) โดยมีสมการในการแปลงดังนี้



$$\begin{aligned}
 w_{ia} &= -\frac{1}{\sqrt{3}}u_{ib} + \frac{1}{\sqrt{3}}u_{ic} \\
 w_{ib} &= -\frac{1}{\sqrt{3}}u_{ic} + \frac{1}{\sqrt{3}}u_{ia} \\
 w_{ic} &= -\frac{1}{\sqrt{3}}u_{ia} + \frac{1}{\sqrt{3}}u_{ib}
 \end{aligned} \tag{3.63}$$

จากสมการ (3.62) จะเป็นแรงดันที่อยู่ในรูปของแรงดันหนึ่งหน่วย และสมการ (3.63) จะเป็นแรงดันที่อยู่ในรูปของแรงดันตั้งฉาก โดยแรงดันทั้งสอง จะถูกแปลงเพื่อเป็นกระแสในองค์ประกอบอินเฟส $i_{f,abc,d}^*$ และองค์ประกอบตั้งฉาก $i_{f,abc,q}^*$ การแปลงองค์ประกอบของทั้งแรงดันทั้งสองจะทำได้โดยสมการที่ (3.64) และ (3.65) ตามลำดับ

$$\begin{aligned}
 i_{fad}^* &= i_{fmd}^* u_{ia} \\
 i_{fbd}^* &= i_{fmd}^* u_{ib} \\
 i_{fcd}^* &= i_{fmd}^* u_{ic}
 \end{aligned} \tag{3.64}$$

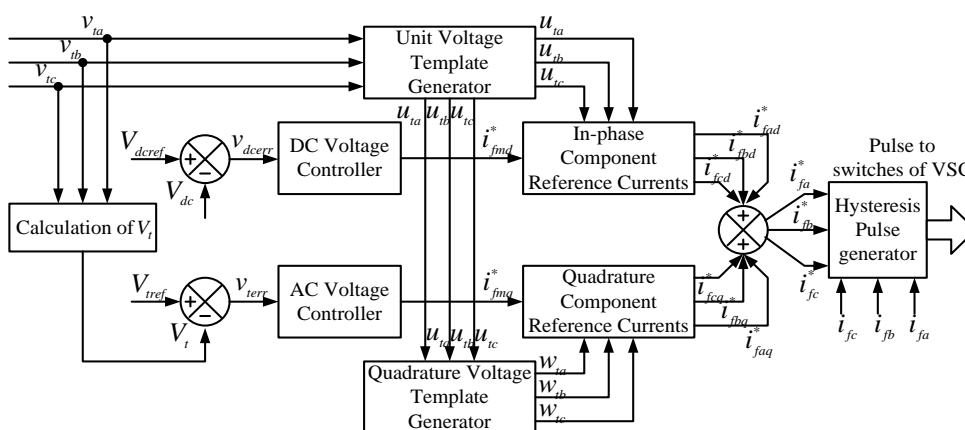
และ

$$\begin{aligned}
 i_{faq}^* &= i_{fmq}^* w_{ia} \\
 i_{fbq}^* &= i_{fmq}^* w_{ib} \\
 i_{fcq}^* &= i_{fmq}^* w_{ic}
 \end{aligned} \tag{3.65}$$

โดยที่ i_{fmd}^* และ i_{fmq}^* เป็นกระแสไฟฟ้าแอกทีฟและกระแสไฟฟารีแอกทีฟซึ่งได้จากการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของดี-สแตตคอมและการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตามลำดับ กระแสอ้างอิงของดี-สแตตคอม จะได้จากผลรวมกระแสขององค์ประกอบหนึ่งหน่วยและองค์ประกอบตั้งฉากดังแสดงในสมการที่ (3.66) และโครงสร้างของการควบคุมแบบอีทเตอร์รีซีสแสดงได้ดังภาพประกอบ 3.12

$$\begin{aligned}
 i_{fa}^* &= i_{faq}^* + i_{fad}^* \\
 i_{fb}^* &= i_{fbq}^* + i_{fbd}^* \\
 i_{fc}^* &= i_{fcq}^* + i_{fcd}^*
 \end{aligned} \tag{3.66}$$

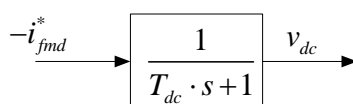




ภาพประกอบ 3.13 การควบคุมกระแสแบบอีทีเทอร์รี่ซีสของดี-สแตดคอม

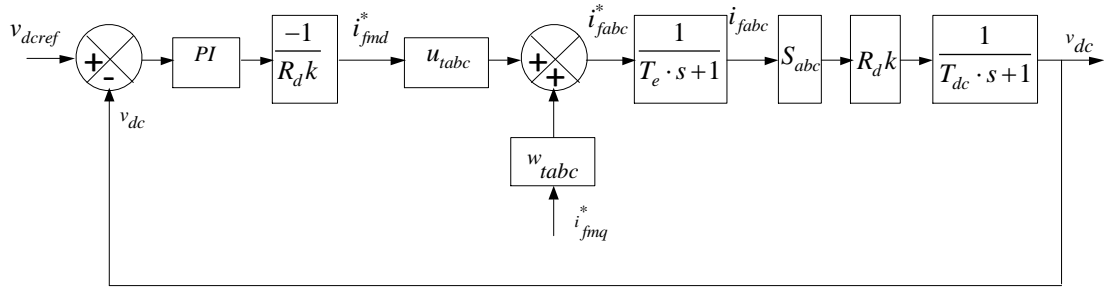
3.4.2 ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากภาพประกอบ 3.13 การควบคุมแรงดันกระแสตรงจะเป็นส่วนหนึ่งในการสร้างกระแสอ้างอิงอินเฟส i_{fmd}^* ซึ่งเป็นกระแสแอกทีฟและจะถูกส่งรวมกระแสรีแอกทีฟ i_{fmq}^* โดยทั้งสองจะเป็นกระแสที่ผ่านเข้าไปยังชุดควบคุมอีทีเทอร์รี่ซีสเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ให้กับอุปกรณ์สวิตช์จากสมการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของดี-สแตดคอม (3.61) เมื่อทำการแปลงลาปลาซทรานส์ฟอร์มจะได้สมการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของดี-สแตดคอมโดยที่ $T_{dc} = R_d C_{dc}$ (Kittaya e al., 2012) เขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังภาพประกอบ 3.14



ภาพประกอบ 3.14 บล็อกไดอะแกรมของ v_{dc}

จากสมการที่ (3.61) จะพบว่า การลดลงของสัญญาณ i_{fmd}^* จะส่งผลให้ v_{dc} เพิ่มขึ้นและในทำนองเดียวกันนี้ การเพิ่มขึ้นของสัญญาณ i_{fmd}^* จะส่งผลให้ v_{dc} ลดลง ดังนั้นกระแสแอกทีฟอ้างอิง i_{fmd}^* สำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จึงสามารถหาได้จากตัวควบคุม PI ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังภาพประกอบ 3.15



ภาพประกอบ 3.15 โดอะแกรมของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากโดอะแกรมในภาพประกอบ 3.15 ชุดควบคุมกระแสแบบฮีสเตอร์รีซิสชันมีค่าการหน่วงเวลา T_e อย่างไรก็ตามค่าหน่วงเวลานี้มีค่าน้อยมากโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง $\frac{1.5}{2f_{sw}}$ ถึง $\frac{1}{f_{sw}}$ (Marianc *et al.*, 2002) ดังนั้นจึงสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังนี้

$$G_{o,vdc}(s) = K_{vdc} G_{vdc}(s) \quad (3.67)$$

เมื่อ

$$K_{vdc} = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \left(\frac{1}{kR_d}\right) u_{t,abc} - k_p \left(\frac{sT_i + 1}{sT_i}\right) \left(\frac{1}{kR_d}\right) u_{t,abc} \quad (3.68)$$

$$G_{vdc}(s) = \left(\frac{1}{sT_{dc} + 1}\right) \left(\frac{kR_d}{sT_e + 1}\right) S_{abc} \quad (3.69)$$

โดยที่ $T_i = \frac{k_p}{k_i}$ ดังนั้น

$$G_{o,vdc}(s) = -k_p \left(\frac{sT_i + 1}{sT_i}\right) \left(\frac{1}{sT_{dc} + 1}\right) \left(\frac{1}{sT_e + 1}\right) \quad (3.70)$$

จากสมการที่ (3.70) สามารถใช้วิธีการปรับค่าการพิจารณาตัวควบคุม PI โดยใช้วิธีค่าเหมาะสมที่สุดที่จุดสมดุล (Symmetrical optimum) ได้ดังสมการที่ (3.71)



$$k_p = \frac{T_{dc}}{2K_d T_e} \quad (3.71)$$

$$T_i = 4T_e \quad (3.72)$$

จากสมการที่ (3.71) และ (3.72) ทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ กำหนดให้ระบบมีค่าความถี่ในการสวิตช์ 10 kHz. จะทำให้ทราบค่า

$$T_e = \frac{1}{f_{sw}}$$

$$T_e = \frac{1}{10 \text{ kHz}} = 0.0001$$

และค่า

$$T_i = 4T_e$$

จะได้

$$T_i = 4 \times 0.0001 = 0.0004$$

ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง $v_{dc} = 6.6 \text{ kV}$ และกำลังไฟฟ้าสูญเสียคิดที่ 2% ของขนาดดี-สแตตคอมคือ 10 MVA จะได้กำลังไฟฟ้าสูญเสีย $P_{loss} = 0.2 \text{ MW}$ ทำให้สามารถหาค่า R_{dc} ได้จากสมการกำลังไฟฟ้า ทำการย้ายข้างสมการเพื่อหาค่า R_{dc} ดังนั้นจะได้ว่า

$$R_{dc} = \frac{V_{dc}^2}{P_{loss}}$$

$$R_{dc} = \frac{(6.6 \text{ kV})^2}{0.2 \text{ MW}} = 217.8 \Omega$$

นำค่า R_{dc} ที่ได้ไปคำนวณหาค่า T_{dc} โดยที่ค่าตัวเก็บประจุมีค่า $C_{dc} = 33 \mu F$

จากสมการ

$$T_{dc} = R_{dc} \times C_{dc}$$

ทำให้ได้

$$T_{dc} = 217.8 \times 33 \mu F = 0.718$$

แทนค่าในสมการ (3.70) เพื่อหา k_p



$$k_p = \frac{0.718}{2 \times 0.0004} = 897.5$$

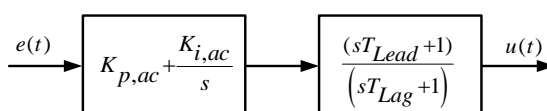
สรุปพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบระบบควบคุมแบบ PI ด้วยวิธีค่าเหมาะสมที่สุดที่จุดสมดุล ได้ดังตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตาราง 3.2 พารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีค่าเหมาะสมที่สุดที่จุดสมดุล

พารามิเตอร์	ปริมาณ	พารามิเตอร์	ปริมาณ
f_{sw}	10 kHz	v_{dc}	6.6 kV
T_e	0.0001	P_{loss}	0.2 MW
T_i	0.0004	R_{dc}	217.8 Ω
T_{dc}	0.718	k_p	879.5

3.4.3 ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วย GA

การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยอุปกรณ์ดี-สแตตคอม ต้องการให้ระบบควบคุมมีประสิทธิภาพในการตามรอยคำสั่งให้ค่าความแตกต่าง ในการตามรอยมีค่าน้อยที่สุดและมีสมรรถนะในการจัดการรบกวนได้ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งมีคุณสมบัติในการตามรอยคำสั่งและจัดการรบกวนได้ดีทำงาน และเพิ่มชุดชดเชยเฟสนำหน้าและชดเชยเฟสล้าหลังด้วย ทั้งนี้เพื่อให้อุปกรณ์ดี-สแตตคอมสามารถทำการรักษาระดับแรงดันที่โหลดบัสได้ดียิ่งขึ้น บล็อกไดอะแกรมแสดงในภาพประกอบ 3.16 (Kittaya, 2012)



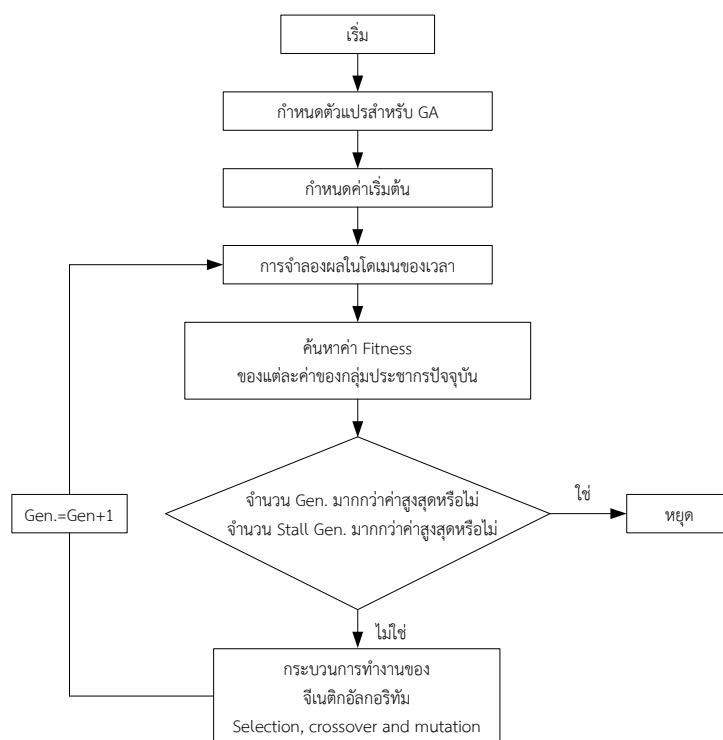
ภาพประกอบ 3.16 ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

อย่างไรก็ตามจากสมการของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (3.14)-(3.19) และสมการของอุปกรณ์ ดี-สแตตคอมที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.4 นั้น อุปกรณ์ดี-สแตตคอมได้ใช้วิธีการควบคุมกระแสแบบอีทีเทอร์ริซีส จึงเป็นผลให้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ดี-สแตตคอมมีความ



ซับซ้อน ทำให้การหาสมการของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส เป็นไปอย่างยุ่งยาก และไม่สามารถหาสมการวงปิดของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ ส่งผลให้การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีการดั้งเดิมนั้นไม่สามารถทำได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้การหาค่าพารามิเตอร์ $K_{p,ac}$, $K_{i,ac}$, T_{Lead} และ T_{Lag} ด้วยวิธีการปัญญาประดิษฐ์

วิธีที่เลือกใช้คือ จีเนติก (GA) ซึ่งเป็นอีกวิธีที่ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการออกแบบการควบคุมในรูปแบบต่างๆ GA คือเทคนิคการสุ่มเอาข้อมูลที่เป็นประโยชน์ของกลุ่มประชากรนั้นๆ มาเข้ากระบวนการแก้ปัญหาของ GA ที่เรียกว่าปฏิบัติการทางสายพันธ์ (Genetic operation) อันได้แก่การรวมตัวใหม่ของโครโมโซม (Recombination operator) หรือการครอสโอเวอร์ (Crossover) และมิวเทชัน (Mutation) เป็นต้น ข้อมูลหรือสายพันธ์ที่ถูกปรับปรุงแล้วจะนำไปปรับปรุงต่อไปเรื่อยๆ โดยมีทิศทางที่ไปยังจุดหมายเดียวกันเพื่อหาคำตอบของจุดประสงค์นั้นๆ เนื่องจาก GA นั้นได้เป็นที่นิยมใช้ในงานวิจัยอย่างแพร่หลาย (Kittaya *et al.*, 2012) ผังกระบวนการทำงานของ GA ในบทความนี้ได้แสดงดังภาพประกอบ 3.17



ภาพประกอบ 3.17 กระบวนการทำงานของจีเนติก

ในส่วนนี้เลือกที่จะนำวิธีการของ GA มาใช้ในการค้นหาพารามิเตอร์ $K_{p,ac}$, $K_{i,ac}$, T_{Lead} และ T_{Lag} ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส ในลำดับขั้นตอนของการปรับค่าพารามิเตอร์นี้เป็น



การจำลองการหาค่าตัวควบคุม PI ของส่วนควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วย MATLAB/Simulink ก่อให้เกิดการแกว่งของขนาดและความถี่ในโดเมนของเวลา กล้องเครื่องมือของ GA จะเตรียมชุดข้อมูล ตั้งต้นเพื่อใช้ในการปรับพารามิเตอร์ จากกระบวนการที่ค้นหาค่าพารามิเตอร์นั้น จะถูกปรับปรุงไปเรื่อยๆจนกระทั่งได้ผลตอบสนองที่เข้าใกล้กับเงื่อนไขของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ที่ต้องการมากที่สุด โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเป็นสิ่งที่บอกกว่าคำตอบที่ได้นั้น สามารถให้ผลตอบสนองที่ดีกับระบบที่ต้องการได้ โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในส่วนนี้แสดงดังสมการที่ (3.73)

$$\text{Minimize } \int_0^{T_{sim}} (\Delta v_{td}(t))^2 dt \quad (3.73)$$

$$\text{Subject to } T_{Lead_min} < T_{Lead} < T_{Lead_max}$$

$$T_{Lag_min} < T_{Lag} < T_{Lag_max}$$

$$K_{i_min} < K_i < K_{i_max}$$

$$K_{p_min} < K_p < K_{p_max}$$

เมื่อ $\Delta v_{td}(t) = v_{td_desires} - v_{td_sim}$

$v_{td_desires}$ คือแรงดันกระแสสลับที่ออกแบบ

v_{td_sim} คือแรงดันกระแสสลับที่ได้จากการจำลองผล

T_{Lead} คือพารามิเตอร์ตัวชดเชยเฟสหน้า

T_{Lag} คือพารามิเตอร์ตัวชดเชยเฟสล้าหลัง

K_i คือค่าเกนของตัวควบคุม I

K_p คือค่าเกนของตัวควบคุม P

จากสมการที่ (3.72) นำมาใช้แก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งได้กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ด้วยความคลาดเคลื่อนของแรงดัน v_{td} การแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีจุดที่เป็นไปได้โดยใช้วิธีการต่างๆเช่น ระเบียบวิธีเกรเดียนต์โปรเจกชัน หรือระเบียบวิธีกำหนดการลำดับกำลังสอง จะใช้หลักการสร้างจุดคำตอบภายใต้เงื่อนไขบังคับ ในหลายๆกรณีการที่จะหาจุดที่เหมาะสมให้สอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ให้มีค่าน้อยที่สุดอาจจะหาค่าได้ยากหรืออาจจะหาค่าไม่ได้เลยกระบวนการวนรอบเพื่อหาช่วงก้าวที่เหมาะสม อาจจะทำให้คำตอบนั้นไม่ลู่เข้าหรืออาจจะใช้เวลาในการคำนวณที่มาก ซึ่งเป็นข้อจำกัดของระเบียบวิธีดังกล่าว จึงได้มีการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการกำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพิ่มเติม ในกรณีที่คำตอบไม่สอดคล้องกับสมการอาจจะ



ใช้วิธีการบวกค่าปรับโทษ (Penalty term) ที่ถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อให้จุดคำตอบที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ จะทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้จุดนี้จะโดนตัดออกในกระบวนการค้นหาช่วงก้ำกึ่งที่เหมาะสม ดังนั้นปัญหาที่เหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ จะถูกลดรูปเป็นปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ ทำให้วิธีแก้ปัญหานั้นอาจจะใช้ระเบียบวิธีขั้นที่สุดหรือระเบียบวิธีคล้ายนิวตัน

ระเบียบวิธีการปรับโทษ (Penalty method) มีกระบวนการดังต่อไปนี้
จากปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2544)

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & f(x) \\ \text{Subject to} \quad & x \in S \end{aligned} \quad (3.74)$$

เมื่อพิจารณาจากปัญหานี้พบว่าจะมีคำตอบ 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่สอดคล้องกับปัญหาและกลุ่มที่ไม่สอดคล้องกับปัญหา โดยกำหนดการปรับโทษ $\Omega(x)$ ดังนี้

$$\Omega(x) = \begin{cases} 0 & ; x \in S \\ +\alpha & ; x \notin S \end{cases} \quad (3.75)$$

จากสมการที่ (3.75) เขียนสมการในรูปการปรับโทษได้ดังนี้

$$\text{Minimize} \quad P(x) = f(x) + \Omega(x) \quad (3.76)$$

จากสมการที่ (3.76) ในทางปฏิบัติแล้วเมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่ มีคำตอบที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับหรือมีค่าเป็นอนันต์ จะทำให้การคำนวณหาค่าได้ยาก ทั้งนี้ไม่สามารถคำนวณค่า ∞ ในทางคณิตศาสตร์ได้ และนอกจากนี้ฟังก์ชันที่ได้นั้นเป็นฟังก์ชันที่ไม่มีความต่อเนื่อง ดังนั้นการใช้พจน์การปรับโทษจะช่วยให้ฟังก์ชันต่อเนื่องที่ให้ค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อคำตอบเข้าใกล้จุดขอบ (Boundary) ของกลุ่มคำตอบที่เป็นไปได้ สามารถเขียนสมการในรูปแบบของฟังก์ชันเงื่อนไขบังคับดังนี้

$$\Omega(x, \rho) = \rho \gamma \{g(x), h(x)\} \quad (3.77)$$

โดยพจน์ของการปรับโทษอาจจะเขียนได้หลายรูปแบบ เช่นฟังก์ชันพาราโบลาหรือกำลังสองเขียนได้เป็น

$$\Omega(x, \rho) = \rho [g(x)]^2, \quad \Omega(x, \rho) = \rho [h(x)]^2 \quad (3.78)$$



สิ่งสำคัญที่ทำให้สมการที่มีเงื่อนไขบังคับเกิดความยุ่งยากก็คือ ถ้า $h(x) < 0$ ค่าพจน์การปรับโทษต้องมีค่าสูง ดังนั้นในการกำหนดค่าปรับโทษจะต้องคำนึงถึงปัญหาดังกล่าวด้วย หรืออาจจะทำได้โดย

$$\Omega(x, r) = \rho [\min\{h(x), 0\}]^2 \quad (3.79)$$

ในการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ได้ทำการบวกเพิ่มค่าปรับโทษ $\Omega(\rho)$ เข้าไปในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ด้วย ดังสมการที่ (3.80)

$$f = \sum_{t=0}^{tsim} (\Delta v_{id}(t))^2 + \Omega(\rho) \quad (3.80)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \Omega(\rho) = & \rho [(\min\{T_{Lead} - T_{Lead_min}\})^2 + (\max\{T_{Lead} - T_{Lead_max}\})^2 \\ & + (\min\{T_{Lag} - T_{Lag_min}\})^2 + (\max\{T_{Lag} - T_{Lag_max}\})^2 \\ & + (\min\{K_i - K_{i_min}\})^2 + (\max\{K_i - K_{i_max}\})^2 \\ & + (\min\{K_p - K_{p_min}\})^2 + (\max\{K_p - K_{p_max}\})^2 \end{aligned}$$

จากการที่ได้ออกแบบตัวควบคุมของการรักษาแรงดันไฟฟ้าด้วยดี-สแตดคอมนั้น ลำดับต่อไปคือการนำเอาตัวควบคุมที่ได้ทำการออกแบบนี้ไปใช้โดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งผลของการทดสอบจะแสดงในบทต่อไป

สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ดี-สแตดคอม โดยแบบจำลองดังกล่าวพิจารณาอุปกรณ์ดี-สแตดคอมเป็นแหล่งจ่ายในอุดมคติ จากนั้นได้ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสลับที่โหลดบัสจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ โดยประยุกต์ใช้การทำให้เป็นระบบเชิงเส้นช่วยในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนนี้ การออกแบบตัวควบคุมของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส ใช้ทฤษฎีการออกแบบระบบควบคุมแบบดั้งเดิม ซึ่งใช้ได้ดีกับระบบที่ไม่มีความซับซ้อน ผลตอบสนองที่ได้จากการออกแบบให้ผลตอบสนองเป็นที่น่าพอใจอย่างไรก็ตาม เนื่องจากในความเป็นจริงแล้ว อุปกรณ์ดี-สแตดคอมมิได้เป็นแหล่งจ่ายในอุดมคติแต่อย่าง



โต หากแต่สร้างขึ้นด้วยวงจรแปลงผันแรงดัน ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมข้างต้นจึงอาจไม่เหมาะสมกับความเป็นจริง

ดังนั้นในบทนี้ยังได้กล่าวถึงการออกแบบ เมื่อพิจารณาที่อุปกรณ์ตี-สแตคคอมทำงานเป็นอุปกรณ์แปลงผันแรงดัน โดยใช้วิธีการควบคุมกระแสแบบฮิเตอร์ริซิส จึงเป็นผลให้การออกแบบระบบจำลองในส่วนการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ มีตัวควบคุมแบบ PI ในรูปในหายไป 2 ชุด เมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ ทั้งนี้ในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัส นั้น มีส่วนของการควบคุม 2 ส่วนคือ ส่วนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งในส่วนนี้ได้ทำการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีการค่าที่เหมาะสมที่จุดสมดุล และส่วนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนั้น เพื่อให้การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัสทำงานได้ดียิ่งขึ้น นอกจากตัวควบคุมแบบ I จึงต้องมีตัวควบคุมแบบ P ตัวชดเชยเฟสนำหน้า (T_{Lead}) และตัวชดเชยเฟสล่าหลัง (T_{Lag}) ร่วมในการทำงานด้วย จึงส่งผลให้เกิดความยุ่งยากขึ้นทำให้วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่านั้น ไม่สามารถทำได้ด้วยวิธีการดั้งเดิม ดังนั้นเพื่อหาค้นหาที่สะดวกขึ้น จึงใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยในการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้คือ GA เนื่องจากได้ใช้งานอย่างกว้างขวาง มาช่วยในการค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทำงานที่สภาวะแรงดันตกที่ค่าต่างๆ ซึ่งผลการทดสอบการทำงานของระบบจำหน่ายที่ติดตั้งอุปกรณ์ตี-สแตคคอมที่ได้ออกแบบนั้นได้นำเสนอไว้ในบทต่อไป



บทที่ 4

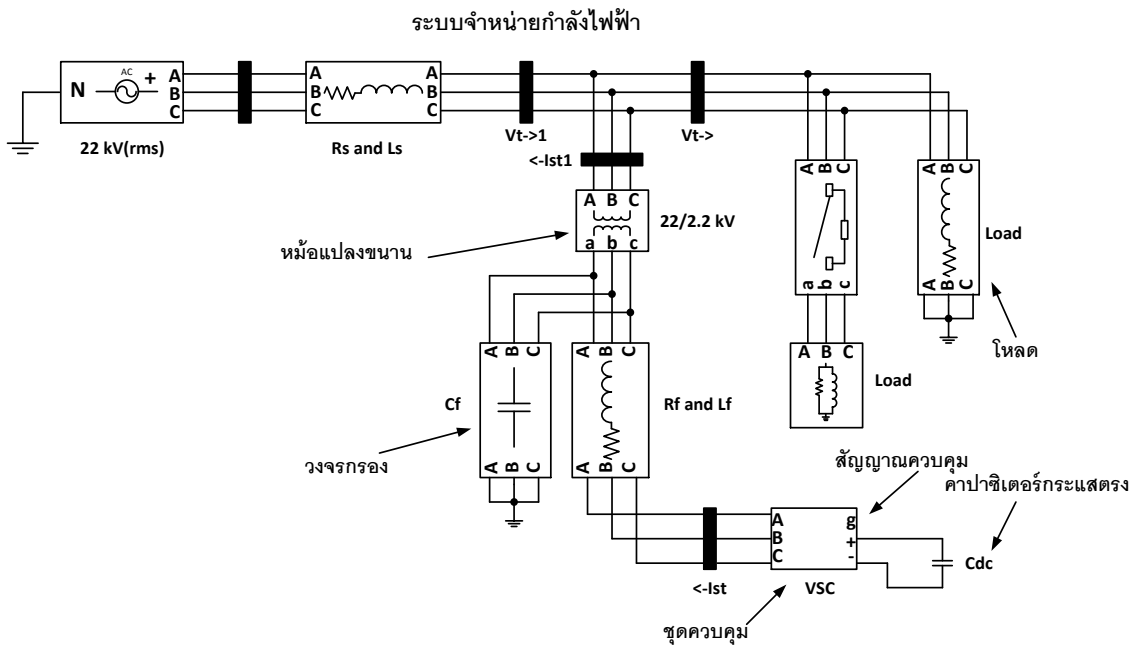
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการศึกษาคุณสมบัติและหลักการทำงานของอุปกรณ์ดี-สแตดคอม เพื่อทำการรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าที่โหลด อันเนื่องมาจากแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินนั้น ในการควบคุมการทำงานใช้วิธีการควบคุมแบบ PI ทำงานร่วมกับตัวชดเชยเฟสนำหน้าและล่าหลัง ซึ่งได้กระทำการหาค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมดังกล่าว ด้วยวิธีการดั้งเดิมและการใช้วิธีการของ GA ในการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัล โดยจำลองสถานการณ์ที่แรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกิน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 แบบจำลองของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

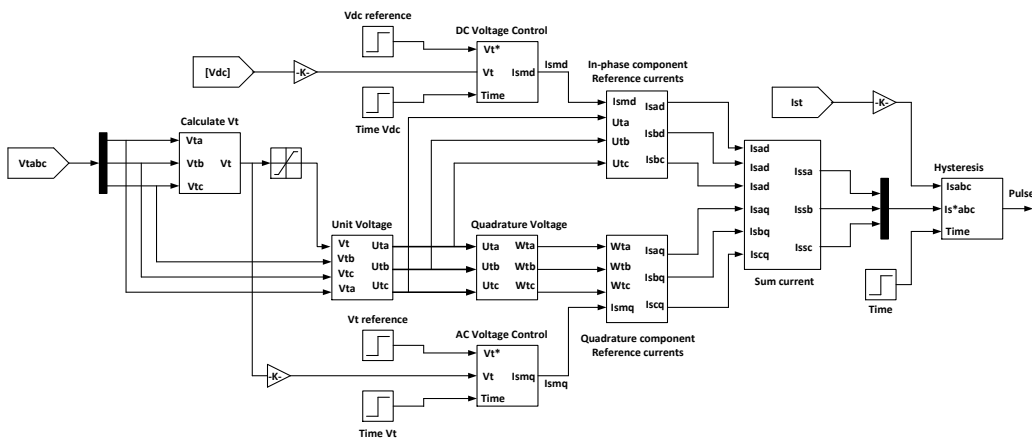
การศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ดี-สแตดคอม เพื่อทำการรักษาแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัลนั้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยแบบจำลองนี้ประกอบด้วยส่วนที่เป็นพารามิเตอร์ต่างๆเช่น พารามิเตอร์ของระบบจำหน่ายและส่วนที่เป็นอุปกรณ์ดี-สแตดคอม โดยส่วนที่เป็นอุปกรณ์ดี-สแตดคอมประกอบไปด้วยวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า คาปาซิเตอร์กระแสตรง หม้อแปลงไฟฟ้าขนาน วงจรกรองและชุดควบคุม ซึ่งแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.1





ภาพประกอบ 4.1 แบบจำลองของระบบที่ใช้ทดสอบในโปรแกรม MATLAB/Simulink

ในส่วนของชุดควบคุมดี-สแตตคอม ที่สร้างในโปรแกรม MATLAB/Simulink นั้นแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.2



ภาพประกอบ 4.2 ชุดควบคุมการทำงานของดี-สแตตคอม

4.2 การออกแบบตัวควบคุมของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวิธีการ GA

จากสมการของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าและอุปกรณ์ ดี-สแตตคอมที่มีการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซิส พบว่าระบบมีความซับซ้อนและไม่สามารถหาสมการของการควบคุมแรงดันไฟฟ้า

กระแสนี้ได้ ส่งผลให้การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ไม่สามารถใช้วิธีการดั้งเดิมได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้การหาค่าพารามิเตอร์ K_p, K_i, T_{Lead} และ T_{Lag} ด้วยวิธีการปัญญาประดิษฐ์โดยได้เลือกใช้วิธีการ GA ซึ่งได้เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง และได้เพิ่มความมั่นใจในการค้นหาคำตอบในงานวิจัยนี้ที่เหมาะสม จึงใช้วิธีที่ค้นหาคำตอบด้วยวิธีที่เป็นลักษณะการสุ่มค่าเช่นเดียวกับวิธีการ GA นั่นคือวิธีการเคลื่อนตัวแบบกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization: PSO) ที่เป็นอีกหนึ่งวิธีทางการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ดี-สแตตคอมนี้ ได้ทำการจำลองสถานะของแรงดันไฟฟ้าตกในระบบตั้งแต่ 0.5 p.u.- 0.9 p.u. และในสถานะแรงดันไฟฟ้าเกินที่ 1.1 p.u. ซึ่งได้ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้ง 3 วิธี ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตาราง 4.1 ค่าที่ปรับตั้งในวิธีการ GA ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

พารามิเตอร์	ค่าที่ปรับตั้ง	พารามิเตอร์	ค่าที่ปรับตั้ง
Tlead	(0.0 , 0.01)	Crossover Function	Scattered
Tlag	(0.0005 , 0.1)	Penalty Factor	100 (Use default)
Kp	(-1 , 1)	Generation	250
Ki	(-50 , -1)	Stall generation	250
Crossover Fraction	0.8	Fitness limit	Inf (Use default)

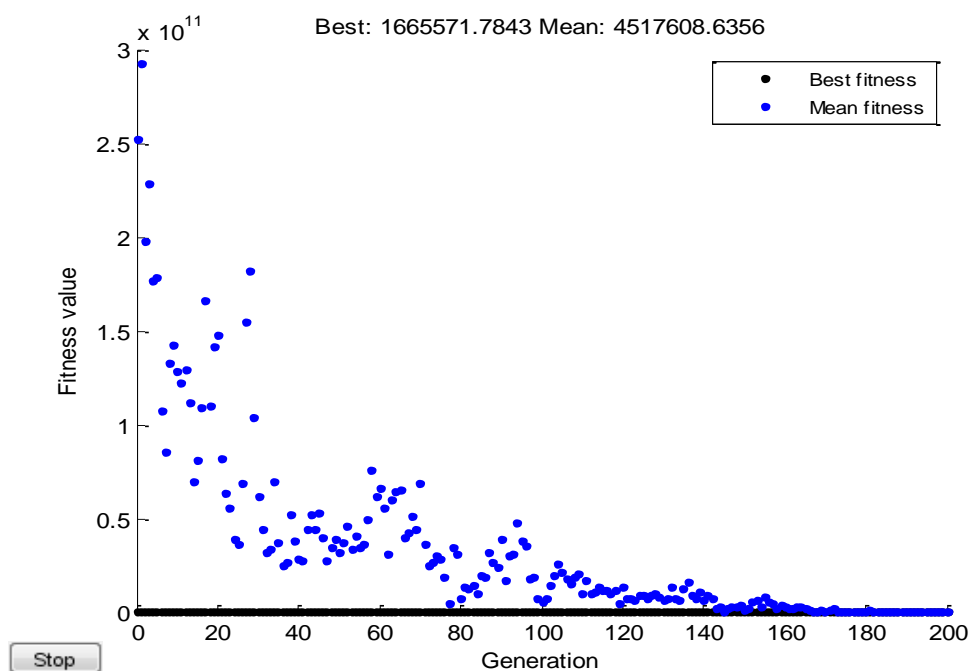
ตาราง 4.2 ค่าพารามิเตอร์ $K_i, K_p, T_{Lead}, T_{Lag}$ ระหว่างวิธีการ GA , PSO และ SISO

แรงดัน	กระบวนการ	TLead	TLag	Ki	Kp	Best Fitness
0.5 p.u.	GA	0.0050	0.0050	-6.3000	0.0030	1665571.784
	PSO	0.0420	0.0697	-13.5725	0.0083	2066426.375
	SISO	-	-	-4.136	-	3172925.872
1.1 p.u.	GA	0.0020	0.0190	-49.884	-0.084	539976.384
	PSO	0.0001	0.0381	-25.4497	-0.5786	570266.639
	SISO	-	-	-34.693	-	585215.566

จากการค้นหาคำตอบของค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ ทั้ง 4 ตัว ด้วยวิธีการทั้ง 3 ในสถานะแรงดันตก 0.5 p.u. และแรงดันเกิน 1.1 p.u. นั้นพบว่าวิธีการดั้งเดิมให้ผลของค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดเป็นจำนวนที่สูงกว่าวิธีการ GA และ PSO นั้นหมายถึงว่าค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้มานั้นอาจจะไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุดต่อระบบ ดังนั้นจากตารางที่ 4.1 แบบจำลองที่ได้ออกแบบการ



ควบคุมสำหรับงานวิจัยนี้ วิธีการ GA นั้นสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้เหมาะสมที่กว่า 2 วิธีที่เหลือ การลู่เข้าสู่คำตอบของการค้นหาด้วยวิธีการ GA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงตัวอย่างการลู่เข้าหาคำตอบในสถานะแรงดันตก 0.5 p.u. ได้ดังภาพประกอบ 4.3



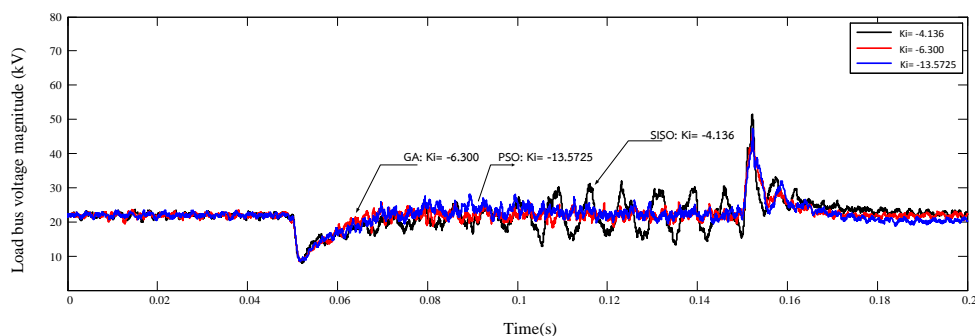
ภาพประกอบ 4.3 การลู่เข้าของคำตอบด้วยวิธี GA

จากภาพประกอบ 4.3 พบว่าในช่วงเริ่มต้นๆของการค้นหาค่าที่เหมาะสมนั้น กลุ่มของข้อมูลได้กระจัดกระจายไปยังค่าต่างๆ จนกระทั่ง เมื่อรุ่นในการค้นหามากขึ้นการกระจายของข้อมูลก็น้อยลงเรื่อยๆ จนกระทั่งสามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ในที่สุด

4.2.1 ผลการทดสอบพารามิเตอร์ด้วยวิธี GA, PSO, SISO

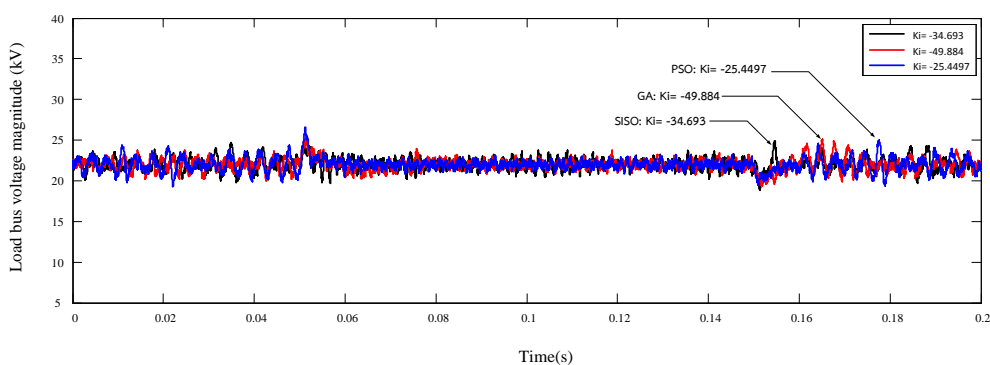
ในการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้ง 3 วิธี คือ GA, PSO และ SISO ได้นำมาจำลองผลในสถานะแรงดันตกคือ 0.5 p.u. และสถานะแรงดันเกินที่ 1.1 p.u. โดยใช้ค่าพารามิเตอร์เป็นไปตามตารางที่ 4.1 มีผลการทดสอบดังภาพประกอบ 4.4 และ ภาพประกอบ 4.5 ตามลำดับ





ภาพประกอบ 4.4 การรักษาแรงดันตกที่ 0.5 p.u. ของวิธี SISO, GA และ PSO

จากภาพประกอบ 4.4 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ระหว่างวิธีการ GA PSO และวิธีการSISO พบว่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการ GA ในช่วงเวลา 0.05-0.15 sec ใช้เวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวจะค่าให้แรงดันที่ใกล้เคียงแรงดันปกติ พร้อมทั้งผลการตอบสนองที่เร็วกว่าและให้สัญญาณที่ค่อนข้างจะเร็วกว่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธี PSO และวิธี SISO



ภาพประกอบ 4.5 การรักษาแรงดันที่แรงดันเกิน 1.1 p.u. ของวิธี SISO, GA และ PSO

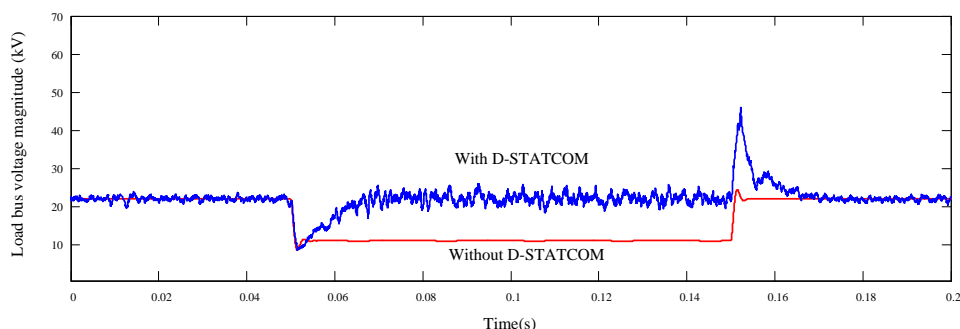
จากภาพประกอบ 4.5 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ระหว่างวิธีการ GA กับวิธีการ PSO และ SISO พบว่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการทั้งสองนั้น ให้ผลตอบสนองของระบบ ในการรักษา ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัส ได้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน

และจากการหาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการ GA เพื่อใช้แทนค่าในแบบจำลองการรักษาแรงดันที่โหลดบัส ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

4.2.2 ผลการทดสอบที่แรงดันตก 0.5 p.u. ด้วยวิธี GA

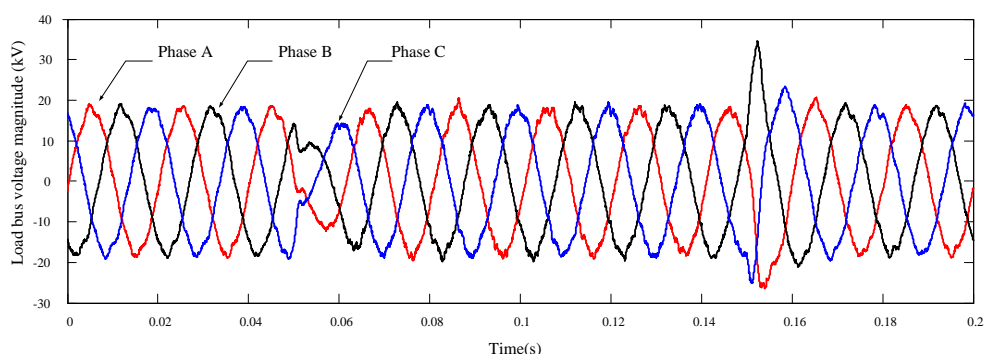
ผลการจำลองอุปกรณ์ดีสแตคคอมและระบบควบคุมที่นำเสนอ กรณีแรงดันในระบบตก 0.5 p.u. ในภาพประกอบ 4.6 เป็นขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส ในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง อุปกรณ์ดี-สแตคคอมที่เวลา 0.05 sec เกิดแรงดันของระบบตก 0.5 p.u. จะพบว่าอุปกรณ์ดี-สแตคคอมสามารถชดเชยแรงดันให้เข้าสู่ระดับแรงดันปกติภายในเวลา 0.01 sec





ภาพประกอบ 4.6 แรงดันที่โหลดดับสก่อนและหลังการชดเชยสภาวะแรงดันตก 0.5 p.u

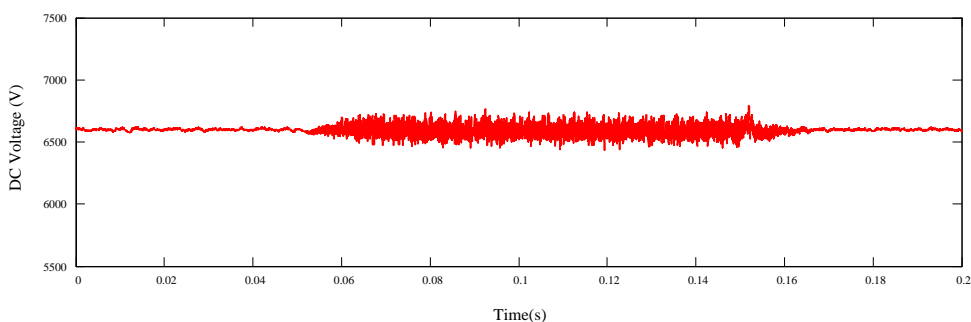
จากภาพประกอบ 4.7 เมื่อเวลา 0.05 sec เกิดแรงดันตกในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งในช่วงเวลาที่แรงดันตกนั้นใช้เวลา 0.1 sec จากนั้นแรงดันไฟฟ้าก็มีระดับแรงดันเข้าสู่ระบบปกติ เป็นผลมาจากการทำงานของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม และเมื่อช่วงเวลาที่ 0.15 sec แรงดันของระบบจำหน่ายได้เข้าสู่สภาวะปกติ อุปกรณ์ดี-สแตตคอมก็หยุดการทำงาน แต่สัญญาณของแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นในช่วงสั้นๆ เล็กน้อย ซึ่งเป็นผลจากการสวิตช์ของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม



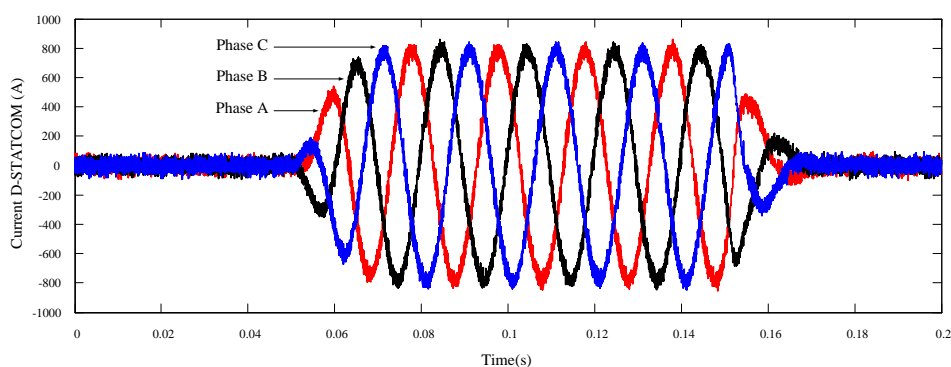
ภาพประกอบ 4.7 แรงดัน V_s ที่แรงดันตก 0.5 p.u.

ภาพประกอบ 4.8 แสดงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ C_{dc} ซึ่งต้องรักษาแรงดันกระแสตรงนี้ไว้ตลอดการทำงานของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม ในขณะที่ทำการรักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดดับส ในกรณีที่แรงดัน V_s เกิดการเปลี่ยนแปลง จากภาพพบว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงถูกรักษาไว้ที่ค่าที่ต้องการได้ตลอดการทำงานของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม ในช่วงที่ดี-สแตตคอมทำการชดเชยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดดับส โดยการฉีดกระแสที่บัสเชื่อมต่อ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.9 ซึ่งเป็นรูปคลื่นสัญญาณของกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา 0.05-0.15 sec ซึ่งเป็นช่วงที่อุปกรณ์ดี-สแตตคอมทำงาน



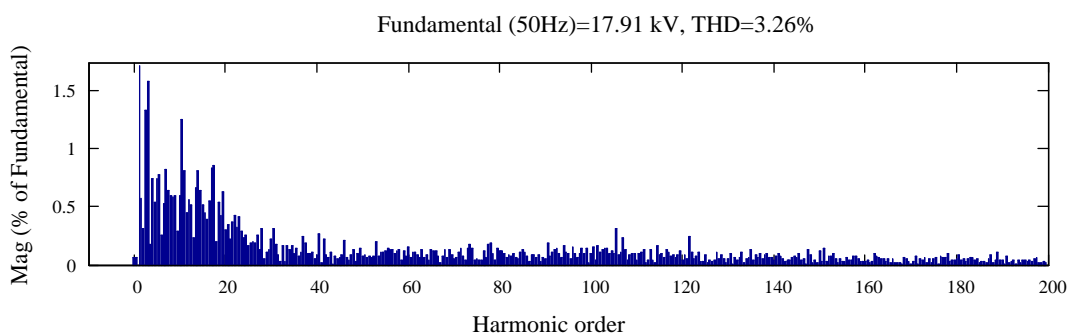


ภาพประกอบ 4.8 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันตก 0.5 p.u.



ภาพประกอบ 4.9 กระแส 3 เฟส ของดี-สแตตคอมที่แรงดันตก 0.5 p.u.

ภาพประกอบ 4.10 แสดงสัญญาณฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัสในขณะที่อยู่ปรกรณ์ดี-สแตตคอมทำงาน พบว่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น ในสภาวะแรงดันตกที่จุดต่ำสุดที่อยู่ปรกรณ์ดี-สแตตคอมในงานวิจัยนี้ จะสามารถทำงานได้ทำงานมีค่าเป็น 3.26% ของความถี่มูลฐาน ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม, 1998)

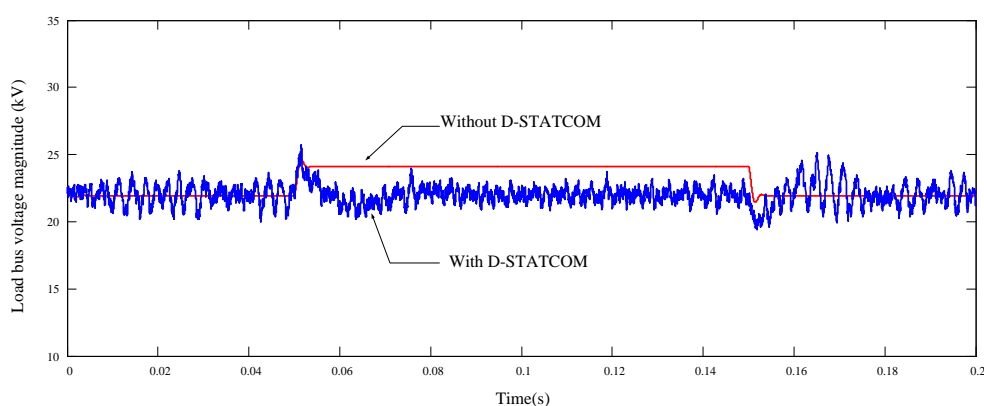


ภาพประกอบ 4.10 ฮาร์มอนิกที่แรงดันตก 0.5 p.u.



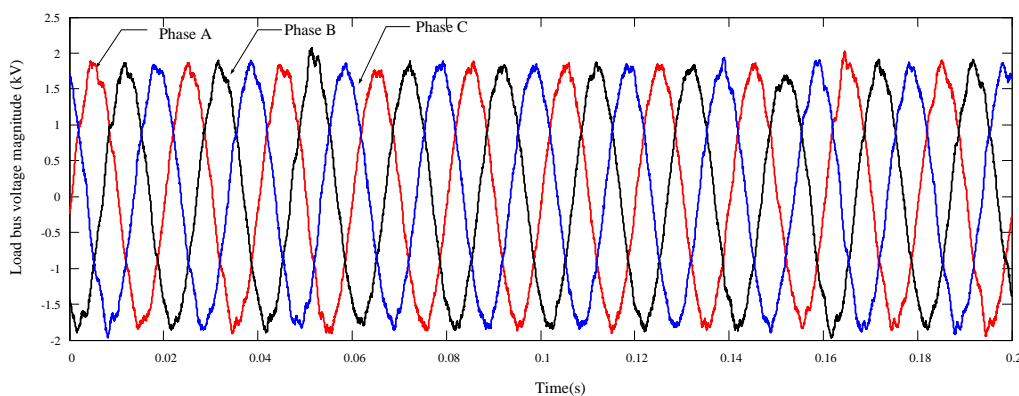
4.2.3 ผลการทดสอบที่แรงดันเกิน 1.1 p.u.

ผลการจำลองอุปกรณ์ดี-สแตตคอมและระบบควบคุมที่นำเสนอ ในกรณีแรงดันไฟฟ้าของระบบเกิน 1.1 p.u. ในภาพประกอบ 4.11 เป็นขนาดของแรงดันกระแสสลับที่โหนดบัสในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ดี-สแตตคอม ที่เวลา 0.05 sec เกิดแรงดันของระบบเกิน 1.1 p.u. จะพบว่าอุปกรณ์ดี-สแตตคอมสามารถรักษาแรงดันให้เข้าสู่ระดับแรงดันปกติภายในเวลา 0.01 sec หลังจากนั้นเมื่อเวลา 0.15 sec ระดับแรงดันของระบบจำหน่ายได้กลับเข้าสู่ภาวะปกติ และอุปกรณ์ดี-สแตตคอมก็ได้หยุดทำงานด้วย



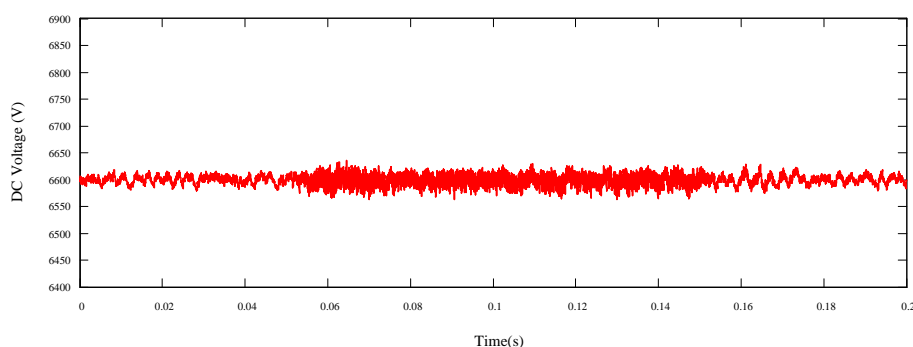
ภาพประกอบ 4.11 แรงดันที่โหนดบัสก่อนและหลังการชดเชยสภาวะแรงดันเกิน 1.1 p.u.

จากภาพประกอบ 4.12 เมื่อเวลา 0.05 sec ได้เกิดแรงดันเกินในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า เป็นผลให้เกิดความไม่สมดุลในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งในช่วงเวลาที่แรงดันเกินนั้นใช้เวลา 0.01 sec เมื่อช่วงเวลาที่ 0.15 sec แรงดันของระบบจำหน่ายได้เข้าสู่สภาวะปกติอุปกรณ์ดี-สแตตคอมก็หยุดการทำงานสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าจึงมีค่าสูงขึ้นในช่วงสั้นๆเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลจากการสวิตช์ของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม

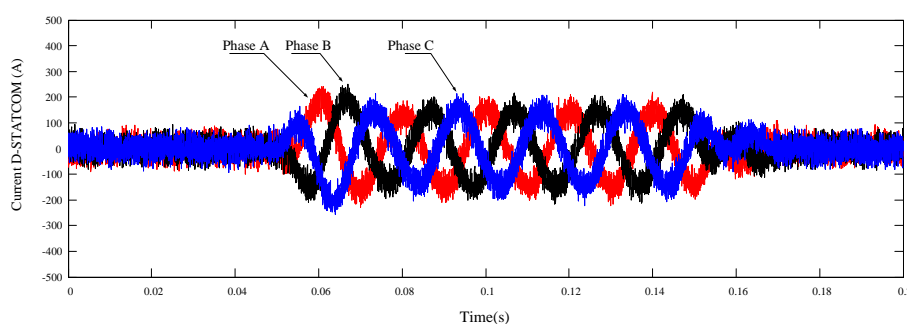


ภาพประกอบ 4.12 แรงดัน V_s ที่แรงดันเกิน 1.1 p.u.

ภาพประกอบ 4.13 แสดงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ C_{dc} ซึ่งต้องรักษาแรงดันกระแสตรงนี้ไว้ตลอดการทำงานของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม ในขณะที่ทำการรักษาแรงดันกระแสสลับที่โหลดบัส ในกรณีที่แรงดัน V_s เกิดการเปลี่ยนแปลง จากภาพพบว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงถูกรักษาไว้ที่ค่าที่ต้องการได้ตลอดการทำงานของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม ในช่วงที่ดี-สแตตคอมได้ทำการชดเชยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัส โดยการฉีดกระแสที่บัสเชื่อมต่อดังแสดงในภาพประกอบ 4.14 ซึ่งเป็นรูปคลื่นสัญญาณของกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา 0.05-0.15 sec ซึ่งเป็นช่วงที่อุปกรณ์ดี-สแตตคอมทำงาน



ภาพประกอบ 4.13 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันเกิน 1.1 p.u.

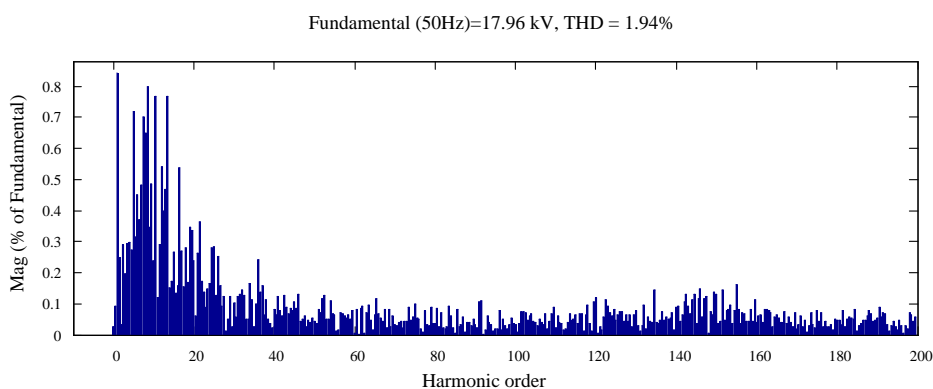


ภาพประกอบ 4.14 กระแส 3 เฟส ของดี-สแตตคอมที่แรงดันเกิน 1.1 p.u.

ภาพประกอบ 4.15 แสดงสัญญาณฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในขณะที่อุปกรณ์ดี-สแตตคอมทำงาน พบว่าฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้น ในสภาวะแรงดันตกที่จุดต่ำสุดที่อุปกรณ์ดี-สแตตคอมในงานวิจัยนี้ จะ



สามารถทำงานได้ทำงานมีค่าเป็น 1.94% ของความถี่มูลฐาน และเป็นไปตามตามมาตรฐานข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทรธุรกิจและอุตสาหกรรม, 1998)



ภาพประกอบ 4.15 ฮาร์มอนิกส์ที่แรงดันเกิน 1.1 p.u.

4.2.4 ผลการทดสอบสภาวะแรงดันตกที่ระดับต่างๆ โดยใช้พารามิเตอร์ 0.5 p.u. ด้วยวิธี GA

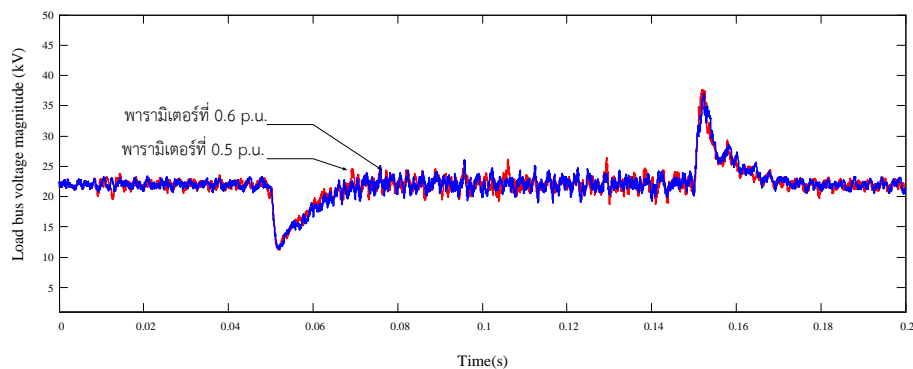
เพื่อเป็นการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้ในขณะที่แรงดันตกสูงสุด ในระบบที่ทำการออกแบบนั้นจะสามารถทำงานคือ 0.5 p.u. และค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวยังสามารถทำงานในสภาวะแรงดันตกอื่นๆ ได้อีกด้วย ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ในสภาวะแรงดันตกที่ค่าต่างๆ ที่ได้จากวิธีการ GA ค่าพารามิเตอร์ในสภาวะแรงดันตกในพิกัดต่างๆ ที่หาได้โดยวิธีการ GA แสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตาราง 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆในสภาวะแรงดันตกด้วยวิธี GA

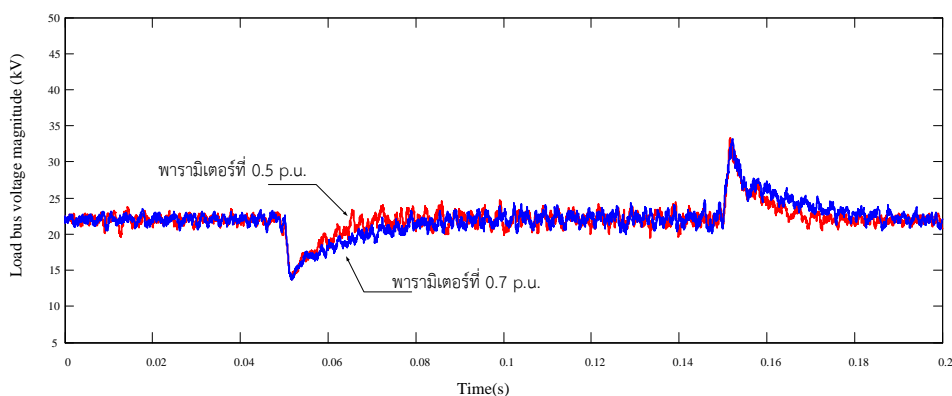
แรงดัน	TLead	TLag	Ki	Kp	Best Fitness
0.5 p.u.	0.0050	0.0050	-6.3000	0.0030	1665571.784
0.6 p.u.	0.0050	0.0050	-5.7660	0.0040	1283678.956
0.7 p.u.	0.0370	0.0240	-4.0510	0.0030	1015332.253
0.8 p.u.	0.0360	0.0230	-9.1040	0.0090	751380.479
0.9 p.u.	0.032	0.014	-5.421	0.019	572727.545



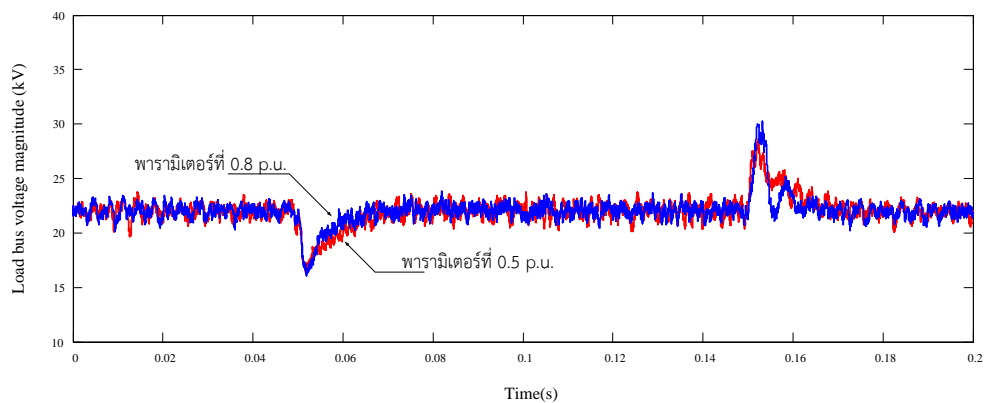
และส่วนของผลการทดสอบในสภาวะแรงดันตก ซึ่งได้จำลองที่แรงดันตกระดับต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างพารามิเตอร์ที่แรงดันตกสูงสุดคือ 0.5 p.u. เปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธี GA ที่สภาวะแรงดันตกขนาดต่างๆ แสดงได้ในภาพประกอบ 4.16-4.19



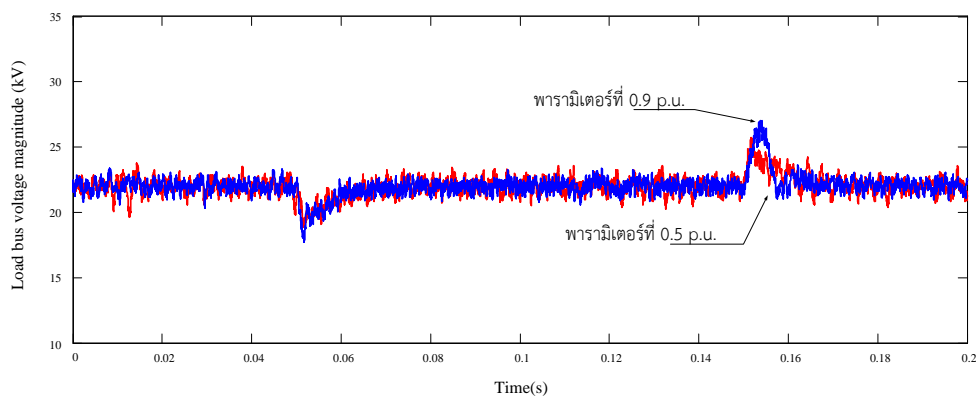
ภาพประกอบ 4.16 แรงดันที่โหลดบัสสภาวะแรงดันตก 0.6 p.u.



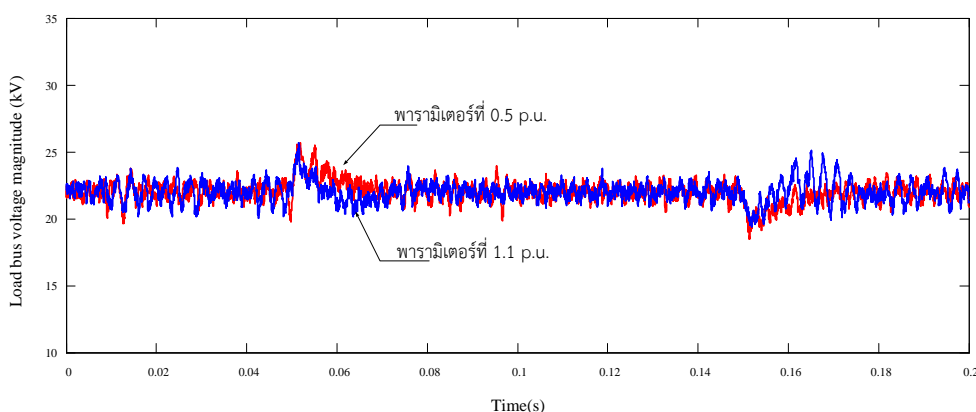
ภาพประกอบ 4.17 แรงดันที่โหลดบัสสภาวะแรงดันตก 0.7 p.u.



ภาพประกอบ 4.18 แรงดันที่โหลดบัสสภาวะแรงดันตก 0.8 p.u.



ภาพประกอบ 4.19 แรงดันที่โหลดบัสสภาวะแรงดันตก 0.9 p.u.



ภาพประกอบ 4.20 แรงดันที่โหลดบัสสภาวะแรงดันเกิน 1.1 p.u.

จากผลการจำลองอุปกรณ์ดี-สแตคคอมและระบบควบคุมที่นำเสนอ ในกรณีแรงดันของระบบ ตก 0.5 p.u. – 0.9 p.u. และในสภาวะแรงดันเกิน 1.1 p.u. ดังภาพประกอบ 4.16 ถึงภาพประกอบ 4.20 เป็นขนาดของแรงดันที่โหลดบัสในกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์ดี-สแตคคอม ที่เวลา 0.05 sec เกิดความผิดปกติของแรงดันไฟฟ้า จะพบว่าอุปกรณ์ดี-สแตคคอมสามารถรักษาแรงดันให้เข้าสู่ระดับแรงดันปกติภายในเวลา 0.01 sec หลังจากนั้นเมื่อเวลา 0.15 sec ระดับแรงดันของระบบจำหน่ายได้กลับเข้าสู่สภาวะปกติ และอุปกรณ์ดี-สแตคคอมก็ได้หยุดทำงานด้วย

สรุป



ในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัส ของอุปกรณ์ดี-สแตดคอม ซึ่งในการทดสอบนั้นได้ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการดั้งเดิม วิธี PSO และวิธี GA ซึ่งได้จำลองผลในสถานะที่แรงดันตก 0.5 p.u. วิธีการดั้งเดิมนั้นสามารถรักษาระดับแรงดันได้แต่ยังไม่ได้ผลตอบสนองที่ดี เนื่องจากแรงดันยังมีการกระเพื่อม แต่วิธี GA และ PSO ที่ให้ผลการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัสใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อรักษาระดับแรงดันของอุปกรณ์ดี-สแตดคอม ด้วยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จากวิธีการ GA ด้วยสถานะแรงดันตก 0.5 p.u. และแรงดันเกิน 1.1 p.u. นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัส โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธี GA ในสถานะแรงดันไฟฟ้าตก 0.5 p.u. มาทำการเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จาก GA ในสถานะแรงดันตก 0.6 p.u., 0.7 p.u., 0.8 p.u., 0.9 p.u., และ 1.1 p.u. ผลจากการทดสอบนั้น พบว่าอุปกรณ์ดี-สแตดคอมที่ออกแบบนั้น สามารถทำการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัส ในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าตกที่ระดับต่างๆได้ผลที่น่าพอใจ



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส ด้วยอุปกรณ์ CPD เพื่อทำการแก้ไขปัญหาคูณภาพกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการต่อเข้าหรือปลดออกของโหลดขนาดใหญ่หรือความผิดปกติจากธรรมชาติ ที่จะส่งผลให้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเกิดแรงดันไฟฟ้าตกหรือแรงดันไฟฟ้าเกิน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโหลดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า จากผลการศึกษาที่ผ่านมาจะกล่าวสรุปผลและข้อเสนอแนะจากการศึกษาในลำดับต่อไป

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 อุปกรณ์ CPDs

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า ด้วยอุปกรณ์ CPDs ชนิดการชดเชยที่แยกประเภทการใช้งานได้ 3 ชนิดคือ

1. ตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต (DVR) ใช้ในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย โดยการแทรกแรงดันอนุกรมเข้ากับระบบ โดยการติดตั้งนั้นจะต่ออนุกรมกับระบบทำให้เกิดความไม่สะดวกในการติดตั้งใช้งาน

2. ดี-สแตตคอม (D-STATCOM) จะทำงานในลักษณะการฉีดกระแสเพื่อทำการชดเชยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัส ดี-สแตตคอมนั้นจะทำการต่อขนานกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้เกิดความสะดวกในการติดตั้งหรือปลดออกจากระบบการจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

3. ตัวปรับสภาวะคุณภาพกำลังไฟฟ้าแบบรวม (UPQC) มีโครงสร้างที่เป็นแบบขนานและอนุกรมที่ต่อร่วมเข้าไฟในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ที่ได้รวมเอาข้อดีของตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัตและดี-สแตตคอมเข้าด้วยกัน

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาการทำงานของดี-สแตตคอม เนื่องจากมีความสะดวกในการปลดออกหรือเชื่อมต่อในการใช้งานจริง เนื่องจากไม่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

5.1.2 การควบคุมการทำงานของดี-สแตตคอม

การควบคุมการทำงานของดี-สแตตคอม จะใช้การควบคุมแบบตัวควบคุม PI ที่อยู่ในกรอบอ้างอิง dq ทำให้จำเป็นต้องมีชุดติดตามเฟส (PLL) และในการควบคุมนั้นจะมีตัวควบคุม PI ทั้งหมด 4 ชุด ทำให้เกิดความซับซ้อนในการออกแบบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการควบคุมแบบฮิเทอริสซิส ทำ



ให้สามารถลดจำนวนตัวควบคุมแบบ PI ในลูปในลงไปได้ 2 ชุด และไม่จำเป็นต้องใช้ตัวติดตามเฟสอีกด้วย โดยในการควบคุมกระแสแบบฮีเตอร์รีซีสนั้น ประกอบไปด้วย ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้นใช้วิธีการค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จุดสมดุล ส่วนการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนั้น หากหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการ SISO จะก่อให้เกิดความยุ่งยากอย่างมาก เนื่องจากต้องทำให้เป็นระบบเชิงเส้น และค่าพารามิเตอร์ที่ได้อาจจะมีความไม่เหมาะสมกับระบบที่ใช้งานจริงได้ ดังนั้นจึงได้ใช้วิธี GA เพื่อทำการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยพารามิเตอร์ที่ต้องทำการค้นหา คือ T_{Lead} , T_{Lag} , K_i และ K_p นอกจากนี้ยังทำการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีการ PSO อีกวิธีด้วย

5.1.3 การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ดี-สแตดคอม

ในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ดี-สแตดคอม ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบโดยจำลองสถานะแรงดันฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกิน ในสถานะแรงดันไฟฟ้าตกที่ 0.5 p.u. ได้ทำการทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส ด้วยการใช้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้ง 3 วิธีได้แก่ วิธีการ SISO, GA และ PSO พบว่าทั้ง 3 วิธีนั้นสามารถทำการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัสได้เช่นกัน แต่พารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการ SISO นั้นให้ผลการตอบสนองในการเข้าสู่จุดตั้งตัวช้ากว่า ส่วนวิธีการ GA กับ PSO ให้ผลของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัสใกล้เคียงกัน

การทดสอบในสถานะแรงดันไฟฟ้าเกิน 1.1 p.u. จากผลการทดสอบนั้นทั้ง 3 วิธีสามารถทำการรักษาระดับแรงดันอันเนื่องมาจากแรงดันไฟฟ้าเกินได้

นอกจากนี้เมื่อนำพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ค่าแรงดันตก 0.5 p.u. มาทำการทดสอบในสถานะแรงดันตกที่ค่าต่าง ๆ นั้นพบว่า พารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการ GA ในสถานะแรงดันไฟฟ้าตก 0.5 p.u. ยังสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัสได้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ในสถานะที่แรงดันตกในระดับต่างๆ ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัสด้วยอุปกรณ์ดี-สแตดคอม โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมใช้วิธีการ GA เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จากผลการทดสอบดังกล่าว ค่าพารามิเตอร์ของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้เป็นค่าที่สถานะการทำงานที่จุดทดสอบเท่านั้น หากพารามิเตอร์ของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง อาจส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่หาได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอthisไม่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นการออกแบบและการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในงานวิจัยต่อไป ควรคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าด้วย



ในส่วนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของดี-สแตดคอมนั้นใช้การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่จุดสมดุล (Symmetrical optimum) ซึ่งอาจจะได้ค่าเหมาะสมสำหรับสภาวะบางสภาวะ ดังนั้นหากทดลองใช้วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในส่วนนี้ด้วยวิธีการอื่นๆ เช่น GA อาจจะส่งผลให้การทำงานของอุปกรณ์ดี-สแตดคอมมีประสิทธิภาพมากขึ้น

นอกจากนี้ ระบบที่ใช้ทดสอบที่ผู้วิจัยนำเสนอถูกกำหนดให้เป็นระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าสมดุล (Balance Voltage) แต่ในสภาวะการทำงานจริงของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้านอกจากการเกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกและเกินแล้ว ปัญหาแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (Unbalance voltage) เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งและส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟอย่างมาก การแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลนี้สามารถกระทำได้โดยใช้อุปกรณ์ดี-สแตดคอมในการชดเชยแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส อย่างไรก็ตามการควบคุมการชดเชยแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลมีความซับซ้อนและยุ่งยาก ดังนั้นการศึกษาและการออกแบบระบบควบคุมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลโดยใช้อุปกรณ์ดี-สแตดคอมจึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจในการทำงานวิจัยต่อไป



เอกสารอ้างอิง



เอกสารอ้างอิง

- คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า (1998) *ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม PRC-PQG-01/1998*. [ออนไลน์].ได้จาก: http://www.pea.co.th/peawiki/Pages/wiki_008.aspx. [สืบค้นเมื่อ 5 พ.ค. 2558].
- ธนัดชัย กุลรวานิชพงษ์ (2544) *การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ, จรัสสินทวงศ์การพิมพ์.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว (2552) *ปัญญาเชิงคำนวณ*. กรุงเทพฯ, จรัสสินทวงศ์การพิมพ์.
- อภิรักษ์ ชัดวิลาส (2011) *การประยุกต์วิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับปัญหาหาค่าที่เหมาะสมที่สุด*. RMUTP Research Journal. 5 (2), 153-163.
- Alka A, Bhim S, Gupta JRP and Mittal AP (2004) Application of DSTATCOM for Isolated System. *IEEE, C* (3), 351-354.
- Anaya Lara O and Acha E (2002) Modeling and Analysis of Custom Power Systems by PSCAD/EMTDC. In: *Power Delivery, IEEE Transactions on*. 17 (1), pp. 266-272.
- Barratt Cand Boyd S (1992) Interactive Loop-Shaping Design of MIMO Controllers. In: *IEEE Symposium on Computer Aided Control System Design, 17-19 Mar 1992, Napa, California, USA*, IEEE Press. pp. 76-81.
- Chen C and Joos G (2000) Series and Shunt Active Power Conditioners for Compensating Distribution System Faults. In: *Canadian Conference on Electrical Computer Engineering, 7-10 Mar 2000, Halifax, Canada*, IEEE Press. pp. 1182-1186.
- Freitas W, Asada E, Morelato A and Xu W (2002) Dynamic Improvement of Induction Generators Connected to Distribution Systems Using a DSTATCOM, In: *Proc. Of IEEE int. Con. On Power System Technology, 13-17 Oct 2002*, pp. 173-177.
- Friedrich F and Orttenger F (1992) *Introduction to Electronic Control Engineering*. New Delhi, Second Wiley Eastern Reprint.
- Fujita H and Akagi H (1996) The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series Active Filters and Shunt Active Filters, In: *Power Electronics Specialists Conference, 23-27 Jun, Baveno, Italy*, pp. 494-501.
- Ghosh A and Ledwich G (2002) *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*. New York, Kluwer Academic Publishers.
- Gygui L (1994) Dynamic Compensation of AC Transmission Line by Solid State



- Synchronous Voltage Sources. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 9 (2), 904-911.
- Hingorani NG (1995) *Introducing Custom Power*. In: *IEEE Spectrum*, 32 (6), 41-48.
- Hochgraf C and Lasseter RH (1998) Statcom Controls for Operation with Unbalanced Voltages. *IEEE Trans. Power Deli.* 13 (2), pp. 538–544.
- Jazayeri M and Fendereski M (2007) Stabilization of Grid Connected Wind Generator During Power Network Disturbances by STATCOM. In: *International Universities Power Engineering Conference. UPEC 2007 42nd. 4-6 Sep 2007, Brighton, England*, IEEE Press. pp. 1182-1186.
- Kasal GK and Singh B (2008) Decoupled Voltage and Frequency Controller for Isolated Asynchronous Generators Feeding Three-Phase Four wire Loads. *IEEE Trans. on Power Delivery.* 23 (2), 966-973.
- Kittaya S (2012) *Control Design and Application of D-STATCOM for Load Voltage Control*. PhD thesis. Suranaree university of Technology.
- Kittaya S, Kulworawanichpong T and Voraphonpiput N (2012) Design of DC Voltage Control for DSTATCOM. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 6 (11), 1401-1407.
- Marian P Kazmierkowski, Krishnan R and Frede Blaabjerg (2002) *Control in Power Electronics Selected Problems*, California, Elsevier Science.
- Molina MG and Mercado PE (2006) Control Design and Simulation of DSTATCOM with Energy Storage for Power Quality Improvements. *IEEE/PES Transmission & Distribution Conf. and Exposition, 15-18 Aug 2006, Caracas, Venezuela*, IEEE Press. pp. 1–7.
- Padiyar KR and Kulkarni AM (1997) Design of Reactive Current and Voltage Controller of Static Condenser. Elsevier Ltd, 19 (6), 397–410.
- Pedro R S'anchez and Enrique A (2014) Design of a Control Scheme for Distribution Static Synchronous Compensators with Power Quality Improvement Capability. *Energies*, 7 (4), 2476-2497.
- Prafull AD, Vishvadeep JD and Ranjeet MB (2014) Brief Review Paper on the Custom Power Devices for Power Quality Improvement. *International Journal of Electronic and Electrical Engineering*, 7 (7), 723-733.
- Pudi S, KV Rao and Devaraju T (2012) Power Quality Enhancement using Custom Power Devices. *International Electrical Engineering Journal (IEEJ)*, 3 (2), 745-750.



- Routimo M, Salo M and Tuusa H (2007) Comparison of Voltage-Source and Current-Sourced Shunt Active Power Filters. In: *IEEE Trans. Power Electronic*, 22 (2). 636 -643.
- S&C Electric company (2015) *Switching Equipment*. [Online]. Available from: <http://www.sand.com/products/power-quality/purewavedstatcom.asp>. [Cited 22 May 2015].
- Schauder C and Mehta H (1993) Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensator, *Transmission and Distribution, IEEE Proceedings*, 140 (4), 299-306.
- Singh B, Saha R, Chandra A and Al Haddad K (2009) Static Synchronous Compensators (STATCOM): A review. *IET Power Electron*, 2 (4), 297-324.
- Singh B and Solanki J (2006) A Comparative Study of Control Algorithm for DSTATCOM for Load Compensation. In: *IEEE International Conf. on Industrial Technology. ICIT 2006*, pp. 1492-1497.
- Wang YP, Hur DR, Chung HH, Watson NR, Arrilaga J and Matair SS (2000) A Genetic Algorithms Approach to Design an Optimal PI Controller for Static VAR Compensator. In: *International Conf. Power System Technology, 4-7 Dec 2000, Perth, Western Australia*, pp. 1557-1562.
- Xiao-ping Yang Y, Yan-Xiao Zhang Z and Yan-ru Z (2008) Three-Phase Four Wire DSTATCOM Based on a Three Dimensional PWM Algorithm. In: *Proc Int. Conf. Electric. Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 6-9 April 2008, Nanjuing, China*. pp. 2061-2066.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
หนังสือรับรองการตีพิมพ์วารสาร มทร.อีสาน





หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสาร มทร.อีสาน

ขอรับรองว่าบทความวิจัย

เรื่อง ตัวควบคุมฟีไอที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการจีนเนติกส์สำหรับดี-สแตดคอม
โดย นายขุนแผน ปฎิมาประกร, รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ อรุโสภา และ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณ เสี่ยมวิบูล

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ
และตีพิมพ์ใน วารสาร มทร.อีสาน
ปีที่ ๙ ฉบับที่ ๑ (มกราคม - เมษายน พ.ศ. ๒๕๕๙)


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิเศษ สุวितารักษ์)
บรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

ภาคผนวก ข
บทความที่รอกการตีพิมพ์วารสาร มทร.อีสาน



ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการจีเนติกสำหรับดี-สแตตคอม

Optimal PI Controller using Genetic Algorithm for D-STATCOM

ขุนแผน ปฏิมาประกร¹ อภินันท์ อรุโศภณ¹ วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล¹

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ แบบจำลองและการออกแบบตัวควบคุมของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม สำหรับการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัล เนื่องจากเกิดการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกิน แบบจำลองที่หาได้ถูกใช้สำหรับการออกแบบชุดควบคุมกระแสและชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยชุดควบคุมกระแสใช้หลักการการควบคุมแบบพีไอแบบปรับค่า ในขณะที่ยังชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงใช้ตัวควบคุมแบบพีและไอ โดยพารามิเตอร์ของตัวควบคุมหาโดยใช้วิธีการค่าเหมาะสมที่สุดที่จุดสมมาตร ในส่วนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัล การออกแบบใช้ตัวควบคุมแบบพีและไอทำงานร่วมกับตัวชดเชยเฟสนำหน้าและล่าหลัง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับถูกค้นหาด้วยวิธีการจีเนติก ระบบที่ใช้ทดสอบเป็นระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าของบัล ระบบที่นำเสนอถูกจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลของการจำลองแสดงให้เห็นว่า อุปกรณ์ ดี-สแตตคอม และชุดควบคุมที่ออกแบบสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัล อันเนื่องมาจากเกิดแรงดันตกและเกินได้อย่างรวดเร็วภายในเวลา 0.01 วินาที

คำสำคัญ : การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า , ดี-สแตตคอม

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม
E-mail : p_khunpan@windowslive.com



Abstract

This article proposes the model and controller design of D-STATCOM for load bus voltage regulation due to the voltage sag and swell. The model had been used to design a current control and DC voltage control. The current control used the hysteresis principles while the DC voltage control used P and I controller. The parameters of P and I controller were determined by the most appropriate method at the symmetrical optimal. For AC load bus voltage control, the P and I controller with the phase leading and lagging compensator are used. The parameters of AC voltage controllers were searched by Genetic Algorithm. The test system in this article was the simple electrical power distribution system by experimenting in the simulation program MATLAB/ Simulink. The result of this experimental showed that the D-STATCOM and the controller design could be maintained the level of the load bus voltage due to the sag and swell quickly within 0.01 seconds.

Keywords : D-STATCOM, Voltage regulation

บทนำ

ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าหนึ่งที่เป็นปัญหาสำคัญคือการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกิน (Voltage sag and swell) แรงดันไฟฟ้าตกคือการลดลงของขนาดแรงดัน ที่ความถี่ไฟฟ้าปกติมาตรฐาน IEEE 1159 มีขนาดลดลงระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 p.u ในช่วงเวลาระหว่าง 0.01 วินาที ถึง 1 นาที (Ghosh A., and Ledwich G., 2002) และแรงดันไฟฟ้าเกินคือ ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสที่ความถี่กำลังไฟฟ้าปกติ มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1 ถึง 1.8 p.u. ในช่วงเวลา 0.01 วินาที ถึง 1 นาที แรงดันไฟฟ้าตกอาจเกิดขึ้นเนื่องจาก เกิดความผิดปกติในระบบ การเพิ่มขึ้นของกระแสไหลดขนาดใหญ่ เพื่อป้องกันความสูญเสียของผู้ใช้ไฟฟ้าจากการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันเกิน ดี-สแตตคอมซึ่งจะต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า เมื่อเชื่อมต่อกับโหลดดี-สแตตคอม ถูกใช้เป็นตัวชดเชยให้กับโหลด เช่น การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง การกรองฮาร์มอนิก และการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัสเป็นต้น (Rao P., Crow M.L., et al., 2000) ดี-สแตตคอมใช้หลักการการทำงานของวงจรแปลง



ต้นแบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage source converter : VSC) จึงถูกประยุกต์ใช้สำหรับการรักษาระดับแรงดันที่โหลดบัล (Padiyar KR., and Kulkarni AM., 1997) (Chen C., and Joos G., 2000) โดยทั่วไปแล้วดี-สแตดคอมจะถูกจำลองโดยการใช้การแปลงบนแกนอ้างอิง d-q ตามการเคลื่อนที่ซิงโครนัส (Synchronous rotating d-q reference frame) สำหรับใช้ในการออกแบบตัวควบคุม (Schauder C., and Mehta H., 1993) ในหลายบทความได้ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมของดี-สแตดคอม ได้มุ่งเน้นศึกษาการควบคุมกระแสเอาต์พุตของดี-สแตดคอม และการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง การควบคุมกระแส แบบแยกการเชื่อมโยง (Decoupling current control) บนกรอบอ้างอิง d-q ถูกนำเสนอใน (Molina M.G., and Mercado P.E., 2006) โดยการควบคุมกระแสจะใช้การควบคุมแบบพีและไอ (PI controller) เพื่อควบคุมกระแสเอาต์พุตของดี-สแตดคอมให้ติดตามกระแสอ้างอิง ซึ่งกระแสอ้างอิงในแกน d และแกน q ได้มาจากชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัล ตามลำดับ นอกจากนี้ (Woei-Luen Chen, Wei-Gang Liang., et al., 2010) ยังได้นำเสนอการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของดี-สแตดคอม ด้วยตัวควบคุมแบบพีและไอเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ตลอดการทำงาน อย่างไรก็ตาม การควบคุมบนกรอบอ้างอิง d-q จำเป็นต้องมีตัวติดตามเฟส (Phase-lock loop) เพื่อใช้ในการแปลงสัญญาณบนกรอบ abc ไปเป็นสัญญาณกรอบอ้างอิง d-q นอกจากนี้การควบคุมนี้จะต้องมีชุดควบคุมแบบพีและไอสำหรับการควบคุมกระแส 2 ชุดซึ่งทำให้ระบบควบคุมมีความซับซ้อนและมีความยุ่งยากในการออกแบบระบบควบคุม

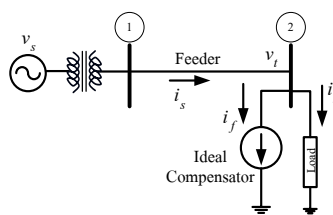
บทความนี้จึงนำเสนอ กลวิธีของการพิจารณาแบบจำลองของอุปกรณ์ดี-สแตดคอม บนกรอบอ้างอิง abc โดยแบบจำลองที่หาได้จะถูกนำไปใช้สำหรับการออกแบบชุดควบคุมกระแส ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และชุดควบคุมไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัลโดยชุดควบคุมกระแสใช้หลักการควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis control) ทำให้การออกแบบระบบควบคุมมีความสะดวกและสามารถลดชุดควบคุมแบบพีและไอสำหรับการควบคุมกระแสลงได้ นอกจากนี้ ด้วยการควบคุมบนกรอบอ้างอิง d-q ระบบควบคุมนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีชุดติดตามเฟส เป็นผลให้การออกแบบระบบควบคุมสามารถทำได้ง่ายและใช้เวลาในการคำนวณสั้นลงด้วย ในส่วนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีและไอถูกหาโดยใช้วิธีการ ค่าเหมาะสมที่สุดที่จุดสมมาตร (Symmetrical optimum) ในขณะที่การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัลจะใช้การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีจีเนติก

วิธีการดำเนินการทดลอง

ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

ระบบที่นำมาพิจารณาเพื่อวิเคราะห์หาแบบจำลอง เป็นระบบจำหน่ายที่จ่ายโหลดโดยมี อุปกรณ์ชดเชยต่อขนานกับโหลดดังแสดงในรูปที่ 1 ที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายที่เปรียบเสมือนเป็นบัสอนันต์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดผ่านสายป้อน โหลดจะถูกพิจารณาว่าเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำโดยมีตัวเก็บประจุต่อขนานซึ่งทำหน้าที่กรองฮาร์มอนิกและแก้อังคค์ประกอบกำลัง



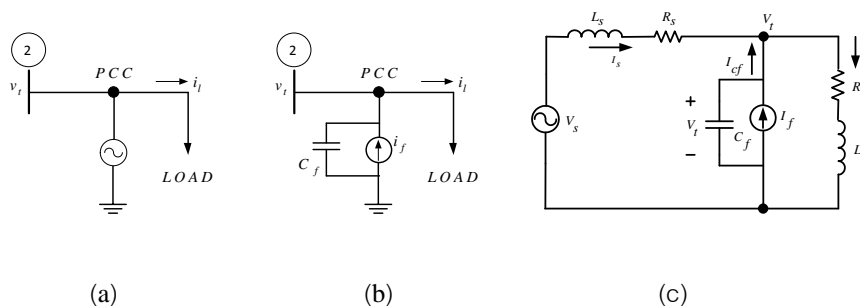


รูปที่ 1 ระบบจำหน่ายที่ติดตั้งดี-สแตตคอม

จากรูปที่ 1 เขียนสมการของกระแสไฟฟ้าด้วย KCL ได้ดังนี้

$$i_f = i_s + i_l \quad (1)$$

เมื่อดี-สแตตคอมทำหน้าที่ชดเชยแรงดันของระบบ ดี-สแตตคอมจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกต้องเชื่อมเข้าระบบที่จุด PCC ดังรูปที่ 2(a) ดี-สแตตคอมจะรักษาแรงดันที่ระบบโดยการฉีดกระแส i_f เข้าสู่ระบบเพื่อทำให้แรงดัน v_t ที่บัส 2 มีค่าตามแรงดันอ้างอิง ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้จะไม่มีการจ่ายหรือดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจริงในสภาวะคงตัว ดังรูปที่ 2(b) และเมื่อระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าติดตั้งดี-สแตตคอม ทำให้ได้วงจรสมมูลของระบบดังรูปที่ 2(c)



รูปที่ 2 การทำงานในสภาวะคงตัวของดี-สแตตคอม

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2 (c) ถ้ากำหนดให้ทั้งหมดเป็นระบบสามเฟสสมดุล สมการของระบบได้ดังสมการที่ (2) – (4)

$$L_s \frac{di_{s,abc}}{dt} = -R_s i_{s,abc} - v_{t,abc} + v_{s,abc} \quad (2)$$

$$C_f \frac{dv_{t,abc}}{dt} = -i_{l,abc} + i_{s,abc} + i_{f,abc} \quad (3)$$



$$L_l \frac{di_{l,abc}}{dt} = -R_l i_{l,abc} + v_{t,abc} \quad (4)$$

โดยที่ $i_{s,abc}$, $i_{f,abc}$, $v_{s,abc}$ และ $v_{t,abc}$ คือเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยค่าของแต่ละเฟส L_l และ R_l คือความเหนี่ยวนำและความต้านทานของโหลด L_s และ R_s คือความเหนี่ยวนำและความต้านทานของแหล่งจ่ายรวมกับสายป้อน และ C_f คือตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ

อุปกรณ์ดี-สแตตคอมและการควบคุม

เมื่อพิจารณาการชดเชยแรงดันของดี-สแตตคอมตามรูปที่ 2(c) ดี-สแตตคอมจะทำงานคล้ายเป็นแหล่งจ่ายแรงดันด้วยการชดเชยกระแส i_f เข้าสู่ระบบเพื่อทำให้แรงดัน v_f มีค่าตามแรงดันอ้างอิง หากพบว่าแรงดันของระบบเกินแรงดันอ้างอิงดี-สแตตคอมจะดูดกลืนกำลังรีแอกทีฟ แต่หากแรงดันตกดี-สแตตคอมจะทำการจ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบ ดี-สแตตคอมที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 3 ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อวงจรแปลงผันกับระบบจำหน่าย และบางครั้งอาจทำหน้าที่เป็นตัวกรองฮาร์มอนิก ร่วมกับตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ ชุดควบคุมมี 3 ชุดได้แก่ ชุดควบคุมกระแส ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อพิจารณาด้านไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ทำให้เขียนสมการของอุปกรณ์ดี-สแตตคอมได้ดังนี้

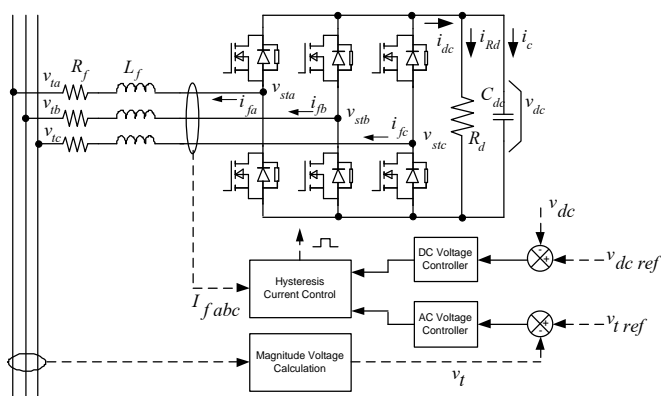
$$L_f \frac{di_{f,abc}}{dt} = -R_f i_{f,abc} + v_{t,abc} - v_{st,abc} \quad (5)$$

โดยที่ $v_{st,abc} = S_{abc} k v_{dc}$ คือแรงดันเอาต์พุตของอุปกรณ์ดี-สแตตคอมและ R_f คือความต้านทานแฝงของตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ (Inductor parasitic resistance) ในขณะที่ k คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวงจรแปลงผันและอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าส่วน $S_{abc} = S_{abc,up} - S_{abc,low}$ คือสัญญาณควบคุมการสวิตช์ของแต่ละเฟสสำหรับด้านไฟฟ้ากระแสตรงจากรูปที่ 4 กระแสไฟฟ้าตรง i_{dc} ประกอบด้วย กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเชื่อมต่อโดยตรง i_c และกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน i_l โดยที่ความต้านทาน R_d แทนการสูญเสียในวงจรแปลงผันหรืออาจกล่าวได้ว่าความต้านทาน R_d และ R_f แทนการสูญเสียแฝงในอุปกรณ์ ดี-สแตตคอมนั่นเอง กำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าวงจรแปลงผันจะเท่ากับกำลังไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรแปลงผัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Power DC} = -\text{Power AC}$$

$$C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = -\frac{v_{dc}}{R_d} - \frac{v_{sta} i_{fa}}{v_{dc}} - \frac{v_{stb} i_{fb}}{v_{dc}} - \frac{v_{stc} i_{fc}}{v_{dc}} \quad (6)$$





รูปที่ 3 โครงสร้างพื้นฐานของดี-สแตตคอม

ชุดควบคุมกระแสแบบอีทเตอร์รีชีสของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม

การควบคุมแบบอีทเตอร์รีชีสถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางเช่น การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า การรักษาค่าแรงดันไฟฟ้า และยังสามารถลดค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นที่โหลดได้อีกด้วย (Shukla A., Ghosh A., et al., 2005) วิธีการควบคุมแบบนี้คือ การนำกระแสที่ได้จากดี-สแตตคอมทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ที่เป็นผลจากเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้า 2 ส่วนคือ แรงดันหนึ่งหน่วย (Unit voltage) และแรงดันตั้งฉาก (Quadrature voltage) คำนวณได้ดังสมการที่ (7) และ (8) จากสมการทั้ง 2 นี้จะทำให้ได้กระแส $i_{f,abc,d}^*$ ที่เป็นองค์ประกอบอินเฟส (In-phase component) และกระแส $i_{f,abc,q}^*$ ที่เป็นองค์ประกอบตั้งฉาก (Quadrature component) ดังสมการที่ (9) และ (10) และจะนำสัญญาณของกระแสไฟฟ้าทั้ง 2 ส่วนนี้มารวมกันตามสมการที่ (11) ชุดควบคุมกระแสแบบอีทเตอร์รีชีสของดี-สแตตคอมแสดงในรูปที่ 5

$$\begin{aligned} u_{ta} &= \frac{v_{ta}}{v_t} \\ u_{tb} &= \frac{v_{tb}}{v_t} \\ u_{tc} &= \frac{v_{tc}}{v_t} \end{aligned} \quad (7)$$

องค์ประกอบแรงดันตั้งฉาก (w_{ta} , w_{tb} และ w_{tc}) ที่ได้จากการแปลงเวกเตอร์อินเฟส (u_{ta} , u_{tb} และ u_{tc}) โดยมีสมการในการแปลงดังนี้

$$\begin{aligned} w_{ta} &= -\frac{1}{\sqrt{3}}u_{tb} + \frac{1}{\sqrt{3}}u_{tc} \\ w_{tb} &= -\frac{1}{\sqrt{3}}u_{tc} + \frac{1}{\sqrt{3}}u_{ta} \\ w_{tc} &= -\frac{1}{\sqrt{3}}u_{ta} + \frac{1}{\sqrt{3}}u_{tb} \end{aligned} \quad (8)$$

โดยที่ $v_t = \sqrt{v_{ta}^2 + v_{tb}^2 + v_{tc}^2}$ ในส่วนของกระแสอ้างอิงอินเฟสและกระแสอ้างอิงตั้งฉากสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



$$\begin{aligned}
 i_{fad}^* &= i_{fmd}^* u_{ta} \\
 i_{fbd}^* &= i_{fmd}^* u_{tb} \\
 i_{fcd}^* &= i_{fmd}^* u_{tc}
 \end{aligned} \tag{9}$$

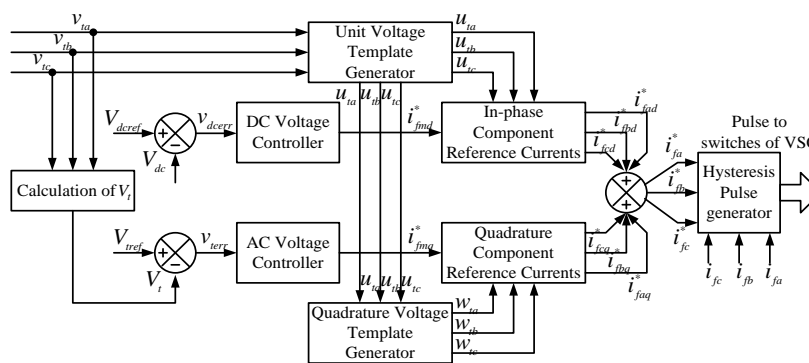
และ

$$\begin{aligned}
 i_{faq}^* &= i_{fmq}^* w_{ta} \\
 i_{fbq}^* &= i_{fmq}^* w_{tb} \\
 i_{fcq}^* &= i_{fmq}^* w_{tc}
 \end{aligned} \tag{10}$$

โดยที่ i_{fmd}^* และ i_{fmq}^* เป็นกระแสไฟฟ้าแอดทีฟและกระแสไฟฟ้ารีแอกทีฟซึ่งได้จากการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของดี-สแตตคอมและการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตามลำดับ กระแสอ้างอิงของดี-สแตตคอม ได้จากผลรวมกระแสขององค์ประกอบหนึ่งหน่วยและองค์ประกอบตั้งฉากดังแสดงในสมการที่ (11)

$$\begin{aligned}
 i_{fa}^* &= i_{faq}^* + i_{fad}^* \\
 i_{fb}^* &= i_{fbq}^* + i_{fbd}^* \\
 i_{fc}^* &= i_{fcq}^* + i_{fcd}^*
 \end{aligned} \tag{11}$$

ชุดควบคุมกระแสจากสมการที่ (7) – (11) แสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชุดควบคุมกระแสแบบอีทีเอวีซีเอสของดี-สแตตคอม

ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

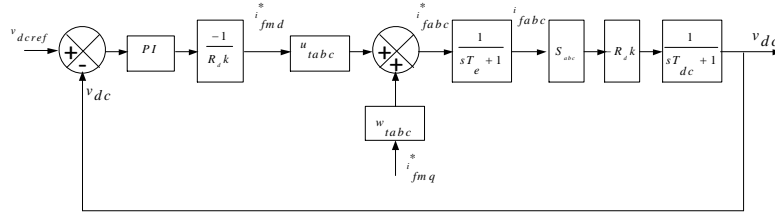
เนื่องจากการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นส่วนหนึ่งในการสร้างกระแสอ้างอิงอินเฟส ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระแสที่จะผ่านไปยังชุดควบคุมแบบอีทีเอวีซีเอส เพื่อใช้สร้างสัญญาณพัลส์สำหรับอุปกรณ์ สวิตซ์จากสมการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม (5) เมื่อนำมาเขียนใหม่จะได้ดังนี้

$$R_d C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + v_{dc} = -i_{fmd}^* \tag{12}$$

โดยที่ $i_{fmd}^* = kR_d (S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc})$ ดังนั้น จากสมการที่ (12) จะทำให้ได้

$$v_{dc} = \frac{-i_{fmd}^*}{sT_{dc} + 1} \tag{13}$$

โดยที่ $T_{dc} = R_d C_{dc}$ จากสมการที่ (13) จะพบว่า การลดลงของสัญญาณ i_{fmd}^* จะส่งผลให้ v_{dc} เพิ่มขึ้นและในทำนองเดียวกันนี้ การเพิ่มขึ้นของสัญญาณ i_{fmd}^* จะส่งผลให้ v_{dc} ลดลง ดังนั้น กระแสแอดคทีฟอ้างอิง i_{fmd}^* สำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจึงสามารถหาได้จากตัวควบคุมแบบพีและไอ ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากไดอะแกรมในรูปที่ 5 พิจารณาตัวควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซิดมีค่าการหน่วงเวลา T_e อย่างไรก็ตามค่าเวลานี้มีค่าน้อยมากโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง $\frac{1.5}{2f_{sw}}$ ถึง $\frac{1}{f_{sw}}$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังนี้

$$G_{o,vdc}(s) = K_{vdc} G_{vdc}(s) \tag{14}$$

เมื่อ

$$K_{vdc} = -\left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left(\frac{1}{kR_d} \right) u_{t,abc} - k_p \left(\frac{sT_i + 1}{sT_i} \right) \left(\frac{1}{kR_d} \right) u_{t,abc} \tag{15}$$

$$G_{vdc}(S) = \left(\frac{1}{sT_{dc} + 1} \right) \left(\frac{kR_d}{sT_e + 1} \right) S_{abc} \tag{16}$$

โดยที่ $T_i = \frac{k_p}{k_i}$ ดังนั้น

$$G_{o,vdc}(S) = -k_p \left(\frac{sT_i + 1}{sT_i} \right) \left(\frac{1}{sT_{dc} + 1} \right) \left(\frac{1}{sT_e + 1} \right) \tag{17}$$



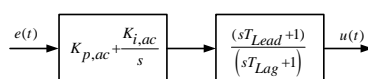
จากสมการที่ (17) สามารถใช้วิธีการปรับค่าการพิจารณาตัวควบคุมแบบพีและไอ โดยใช้วิธีค่าเหมาะสมที่สุดที่จุดสมมาตร (Friedrich F., Fritz O., 1992) (Marian P.Kazmierowski., et al., 2002) ได้ดังสมการที่ (18)

$$k_p = \frac{T_{dc}}{2K_d T_e} \quad (18)$$

$$T_i = 4T_e \quad (19)$$

การออกแบบชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยอุปกรณ์ดี-สแตตคอม ต้องการให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะในการตามรอยคำสั่งให้ค่าแตกต่างในการตามรอยมีค่าน้อยที่สุดและมีสมรรถนะในการจัดการรบกวนได้ดี ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีและไอซึ่งมีคุณสมบัติในการตามรอยคำสั่งและจัดการรบกวนได้ดีทำงานดังแสดงในรูปที่ 6 (Kittaya S., 2012)



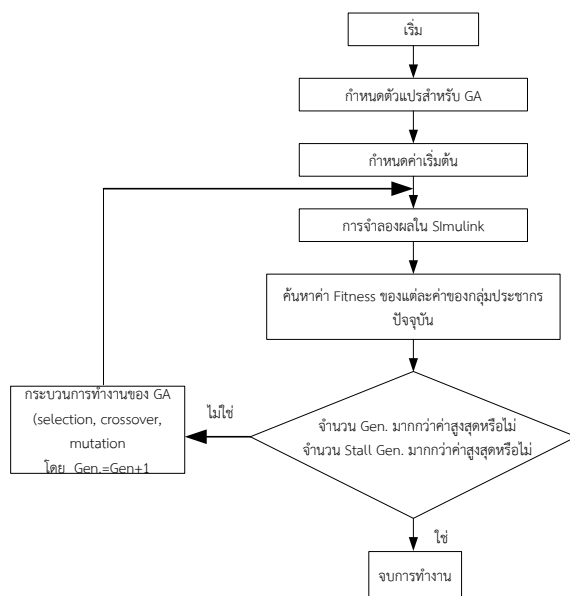
รูปที่ 6 ไตอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

อย่างไรก็ตามจากสมการของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าและอุปกรณ์ ดี-สแตตคอมดังสมการที่ (1) – (5) พบว่าระบบมีความซับซ้อนและไม่สามารถหาสมการวงปิดของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ ส่งผลให้การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ไม่สามารถใช้วิธีการดั้งเดิม (Classical control) ดังนั้นในบทความนี้จึงใช้การหาพารามิเตอร์ $K_{p,ac}$, $K_{i,ac}$, T_{Lead} และ T_{Lag} ด้วยวิธีการปัญญาประดิษฐ์

การหาค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวิธีการจีเนติก

จีเนติกอัลกอริทึม (GAs) เป็นอีกกระบวนการที่ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการออกแบบการควบคุมในรูปแบบต่างๆ GAs คือเทคนิคการสุ่มเอาข้อมูลที่เป็นประโยชน์ของกลุ่มประชากรนั้นๆ มาเข้ากระบวนการแก้ปัญหาของ GAs ที่เรียกว่าปฏิบัติการทางสายพันธ์ (Genetic operation) อันได้แก่การรวมตัวใหม่ของโครโมโซม (Recombination operator) หรือการครอสโอเวอร์ (Crossover) และมิวเทชัน (Mutation) เป็นต้น ข้อมูลหรือสายพันธ์ที่ถูกปรับปรุงแล้วจะนำไปปรับปรุงต่อไปเรื่อยๆ โดยมีทิศทางที่ไปยังจุดหมายเดียวกันเพื่อหาคำตอบของจุดประสงค์นั้นๆ เนื่องจาก GAs นั้นได้เป็นที่นิยมใช้ในงานวิจัยอย่างแพร่หลาย (Kittaya S., Kulwrawanichpong., et al., 2012) กระบวนการทำงานของจีเนติกในบทความนี้ได้แสดงดังรูปที่ 7





รูปที่ 7 กระบวนการทำงานของจีเนติก

ในส่วนนี้เลือกที่จะนำวิธีการของ GAs มาใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ $K_{p,ac}$, $K_{i,ac}$, T_{Lead} และ T_{Lag} ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส ในลำดับขั้นตอนของการปรับค่าพารามิเตอร์นี้เป็นการจำลองการหาค่าตัวควบคุมพีและไอ ของส่วนควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วย MATLAB/Simulink ก่อให้เกิดการแกว่งของขนาดและความถี่ในโดเมนของเวลา กล้องเครื่องมือของ GAs จะเตรียมชุดข้อมูลตั้งต้นเพื่อใช้ในการปรับพารามิเตอร์ จากกระบวนการที่ค้นหาพารามิเตอร์นั้นจะถูกปรับปรุงไปเรื่อยๆจนกระทั่งได้ผลตอบสนองที่เข้าใกล้กับจุดประสงค์ที่ต้องการมากที่สุด โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) จะเป็นสิ่งที่บอกว่าคุณค่าที่ได้นั้นสามารถให้ผลตอบสนองที่ดีกับระบบที่ต้องการได้ โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในส่วนนี้แสดงดังสมการที่ (20)

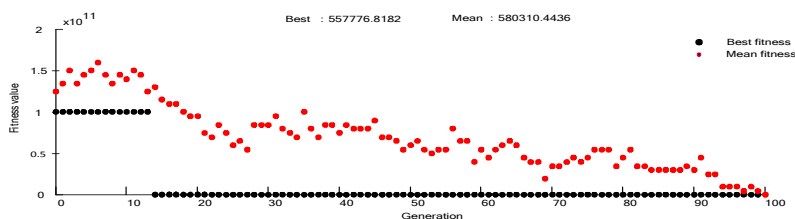
$$\min \left\{ \int_0^{t_{sim}} (\Delta v_{td}(t))^2 dt \right\} \tag{20}$$

เมื่อ $\Delta v_{td}(t) = v_{td\ desired} - v_{td\ sim}$

$v_{td\ desired}$ คือ ผลตอบสนองแรงดันกระแสสลับที่ต้องการ

$v_{td\ sim}$ คือ แรงดันกระแสสลับที่ได้จากการจำลองผล

สำหรับการหาค่าพีและไอ ที่เหมาะสมที่สุดในชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วย GAs นั้นได้ผลการค้นหาดังรูปที่ 8 โดยพบว่าค่าการลู่เข้าของค่าตอบของ mean fitness นั้นมีค่าที่ลดลงเรื่อยๆจนถึงรุ่นที่ตั้งค่าไว้ และค่า best fitness ได้ลู่เข้าหาค่าตอบประมาณรุ่นที่ 15 ของการค้นหา



รูปที่ 8 การค้นหาค่าที่เหมาะสมด้วย GA

ผลการทดลองและวิจารณ์

สำหรับการออกแบบชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบนี้ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งเป็นระบบการทดสอบแบบ 2 บัส ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการจำลองผล

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ทดสอบ

พารามิเตอร์	ปริมาณ	พารามิเตอร์	ปริมาณ
V_s	22 kV	R_d	21780 Ω
R_s	1.45644 Ω	R_f	0.01 Ω
L_s	38.666 mH	L_f	13.76 mH
R_L	116 Ω	C_f	5e-6 F
L_L	1 mH	Cdc	33e-6 F

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของชุดควบคุมแรงดันกระแสตรง

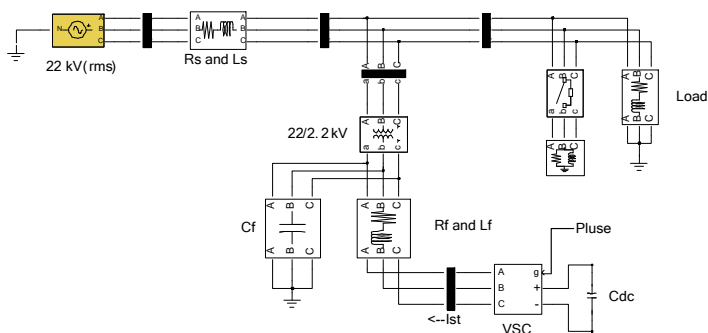
พารามิเตอร์	ปริมาณ	พารามิเตอร์	ปริมาณ
T_{dc}	0.718	K_p	-897.5
T_i	0.0016	K_i	560937.5
T_e	0.0004	T_d	0.001

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับจากการค้นหาด้วยวิธีจีเนติก

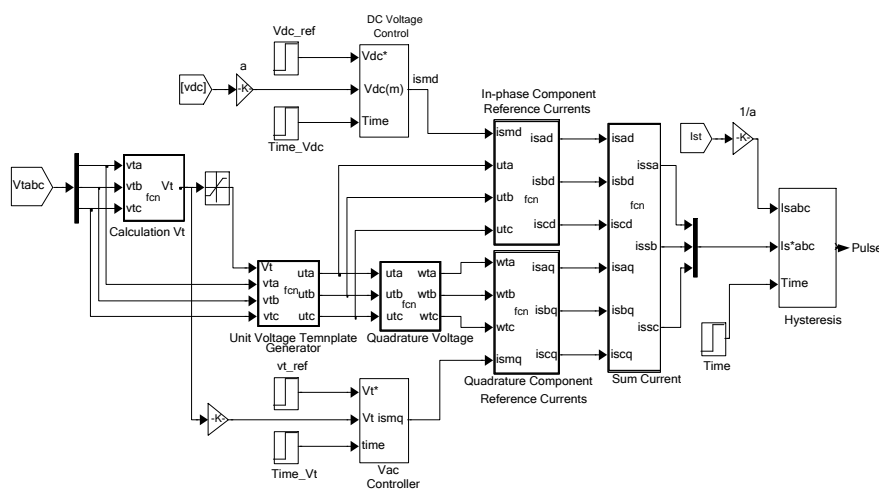
กรณี	T_{Lead}	K_i	T_{Lag}	Best Fitness
แรงดันตก 0.3 pu.	0	-8.455	0.003	557776.818
แรงดันเกิน 0.1 pu.	0	-15.095	0.003	252432.083



จากพารามิเตอร์ของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ได้นำมาจำลองผลการทำงานด้วย โปรแกรม MATLAB/Simulink ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่ามีได้มีอุปกรณ์แปลงผันติดตั้งไว้ในระบบด้วย ซึ่งอุปกรณ์แปลงผันก็คือดี-สแตตคอมนั่นเอง และได้แสดงชุดควบคุมการทำงานของดี-สแตตคอมในรูปที่ 10



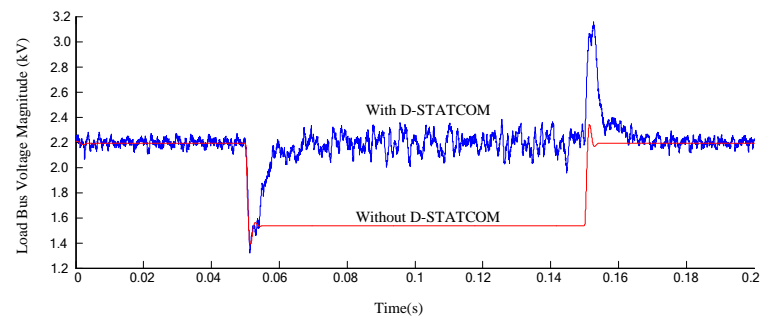
รูปที่ 9 ระบบที่ใช้ทดสอบด้วย MATLAB/Simulink



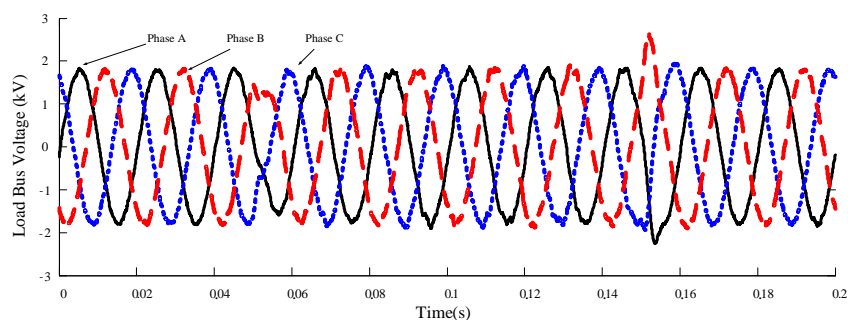
รูปที่ 10 ชุดควบคุมอุปกรณ์ดี-สแตตคอมใช้ทดสอบด้วย MATLAB/Simulink

ผลการทดสอบกรณีแรงดันไฟฟ้าตก 0.3 pu.

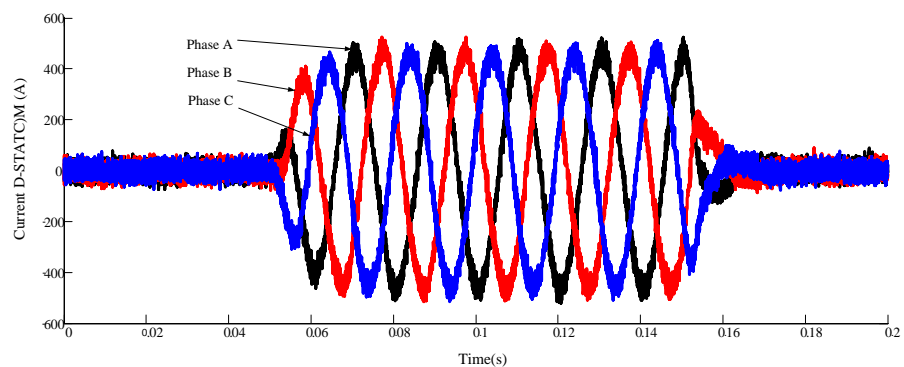
ผลการจำลองอุปกรณ์ดี-สแตตคอมและระบบควบคุมที่นำเสนอกฎนี้เกิดแรงดันตก 0.3 pu. ในรูปที่ 11 เป็นขนาดของแรงดันที่โหลดบัสในกรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์ดี-สแตตคอม ที่ทำหน้าที่ชดเชยแรงดันที่โหลดบัส ที่เวลา 0.05 วินาที เกิดแรงดันของระบบตก 0.3 pu. พบว่าอุปกรณ์ดี-สแตตคอมสามารถชดเชยแรงดันให้เข้าสู่ระดับแรงดันปกติภายในเวลา 0.01วินาที โดยสัญญาณของแรงดันและกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ



รูปที่ 11 สัญญาณแรงดันที่บัสก่อนและหลังการชดเชย



รูปที่ 12 สัญญาณแรงดันที่บัสที่แรงดันตก 0.3 pu.

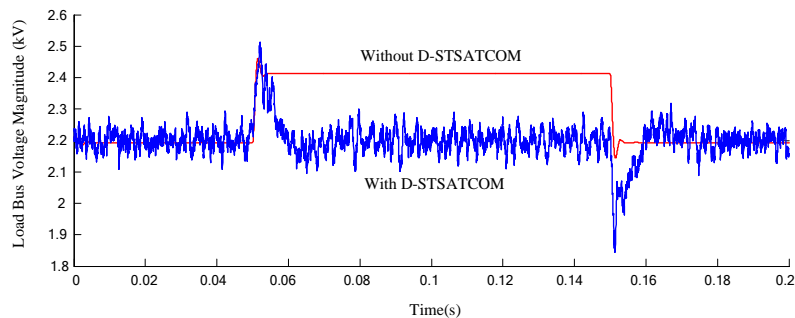


รูปที่ 13 สัญญาณกระแสที่โหลดที่แรงดันตก 0.3 pu.

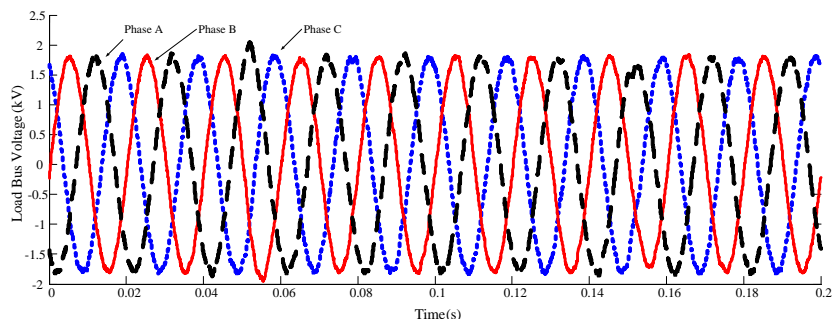
ผลการทดสอบกรณีแรงดันไฟฟ้าเกิน 0.1 pu.

ผลการจำลองอุปกรณ์ดี-สแตตคอมและระบบควบคุมที่นำเสนอก่อให้เกิดแรงดันเกิน 0.1 pu. ในรูปที่ 14 เป็นขนาดของแรงดันที่โหลดบัสในกรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์ดี-สแตตคอม ที่ทำหน้าที่ชดเชยแรงดันที่โหลดบัส ที่เวลา 0.05 วินาที เกิดแรงดันของระบบเกิน 0.1 pu. พบว่าอุปกรณ์ดี-สแตตคอมสามารถชดเชยแรงดันให้เข้าสู่ระดับแรงดันปกติภายในเวลา 0.01 วินาที โดยสัญญาณของแรงดันและกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 15 และ 16 ตามลำดับ

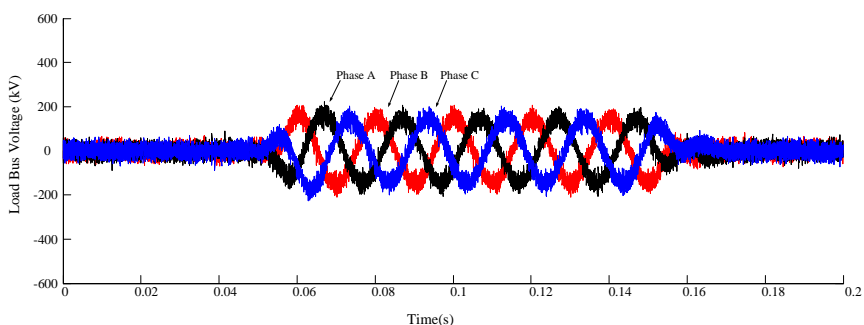




รูปที่ 14 สัญญาณแรงดันที่บัส ก่อนและหลังการชดเชย



รูปที่ 15 สัญญาณแรงดันที่บัสที่แรงดันตก 0.3 pu.



รูปที่ 16 สัญญาณกระแสที่โหลดที่แรงดันเกิน 0.1 pu.

สรุปผลการทดลอง

บทความนี้ได้นำเสนอ กลวิธีของการพิจารณาแบบจำลองของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม บนกรอบอ้างอิง abc โดยแบบจำลองที่หาได้จะถูกนำไปใช้สำหรับการออกแบบชุดควบคุมกระแส ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และชุดควบคุมไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัส โดยชุดควบคุมกระแสใช้หลักการควบคุมแบบอีทเดอริชิส ในส่วนของ การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีและไอถูกหาโดยใช้วิธีการ ค่าเหมาะสม

ที่สุดที่จุดสมมาตรในขณะที่การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสลับที่โหลดบัลจะทำการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีจีเนติก ในการออกแบบจะพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากการจำลองผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้ากระแสลับบนโปรแกรม MATLAB/Simulink อุปกรณ์ดี-สแตตคอม และชุดควบคุมที่นำเสนอถูกทดสอบบนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าสองบัสอย่างง่ายด้วยการจำลองโดยใช้ PSB ของโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลของการจำลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ดี-สแตตคอมและชุดควบคุมที่นำเสนอในการรักษาระดับแรงดันที่โหลดบัลเนื่องจากเกิดแรงดันตกและเกินได้อย่างรวดเร็วและมีเสถียรภาพที่จุดทำงานต่างๆ

บรรณานุกรม

- Acha E., Agelidis V.G., Anaya-Lara O., and Miller T.J.E., (2002). Power Electronic control in Electrical system, (Reed Educational and Professional Publishing, Oxford)
- Chen C., and Joos G., (2000). Series and shunt active power conditioners for compensating distribution system faults, Proc. Canadian Conf. Electrical Computer Engineering, pp. 1182 –1186.
- Friedrich Frohr and Fritz Ortttenburger., (1992). Introduction to electronic control engineering, (Second Wiley Eastern Reprint, New Delhi).
- Ghosh A.,and Ledwich, G., (2002). Power quality enhancement using custom power devices, (Kluwer Academic Publishers,Massachusetts)
- Kittaya S. 2012, Control design and application of D-STATCOM for load voltage control, Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Suranaree university of Technology.
- Kittaya S., Kulworawanichpong, and Voraphonpiput N., (2012). Design of DC voltage control for D-STATCOM. World Academy of Science, Engineering and Technology 71.
- Marian P. Kazmierkowski, Krishnan R., and Frede Blaabjerg., (2002). Control in power Electronicsselected problems , (Elsevier Science, California).
- Molina, M.G., and Mercado, P.E., (2006). Control design and simulation of DSTATCOM with energy storage for power quality improvements, IEEE/PES Transmission & Distribution Conf. Exposition: Latin America, TDC'06,15-18 August 2006, pp.1– 7.
- Padiyar KR., and Kulkarni AM., (1997). Design of reactive current and voltage controller of static condenser, Elect. Power Energy Syst., 19, (6), pp. 397 – 410.
- Rao P., Crow M.L., and Yang Z., (2000). STATCOM control for power system voltage control Applications, IEEE Trans. Power Deliv., 15, (4), pp. 1311 – 1317.
- Schauder C., and Mehta H., (1993). Vector analysis and control of advanced static VAr Compensators, Proc. Inst. Elect. Eng. C, Gen. Transm. Distrib., Jul, pp. 299 – 306.
- Shukla A., Ghosh A., Joshi A., (2005). A hysteresis current controlled flying capacitor multilevelinverter based DSTATCOM, Power Engineering Society Society General Meeting, IEEE, pp. 857 - 864 Vol. 1.
- Woei-Luen Chen, Wei-Gang Liang, and Hrong-Sheng Gau., (2010). Design of a mode decoupling STATCOM for voltage control of wind-driven induction generator systems, IEEE Trans. Power Deliv., 25, (3), pp.1758 – 1767.



ประวัติย่อผู้วิจัย



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ นามสกุล	นายขุนแผน ปฎิมาประกร
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 29 พฤศจิกายน พ.ศ. 2516
จังหวัด และประเทศที่เกิด	อำเภอชุมแพ จังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2535 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาช่างไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น พ.ศ. 2538 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาช่างไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น พ.ศ. 2540 ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต (ค.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น พ.ศ. 2546 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี พ.ศ. 2559 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม
ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน	ปฏิบัติหน้าที่ตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้	150/37 หมู่ 6 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัด ขอนแก่น 40000

