



วิทยานิพนธ์

วิธีการการกำหนดมาตรฐานความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก

Determination Methodology of Harmonic Distortion Standards

นายทรงยศ บุญปั้น

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. ๒๕๕๑



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชา

เรื่อง วิธีการการกำหนดมาตรฐานความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก

Determination Methodology of Harmonic Distortion Standards

นามผู้วิจัย นายทรงยศ บุญปิ่น

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์เกียรติคุณ กวีญาณ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์คุณชัยสิทธิ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกียรติคุณ กิระเกตุ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงค์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 2 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

วิธีการการกำหนดมาตรฐานความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก

Determination Methodology of Harmonic Distortion Standards

โดย

นายทรงยศ บุญปิ่น

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
พ.ศ. 2551

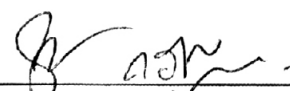
ทรงยศ บุญปั้น 2551: วิธีการกำหนดมาตรฐานความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก ปริญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์
เกียรติคุณ กวีญาณ, Ph.D. 59 หน้า

จากการศึกษามาตรฐานความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของประเทศอังกฤษ ฝรั่งเศส
สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี และสวีเดน พบว่าทุกประเทศให้ความสำคัญกับ
 $\%THD_v$ ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดปริมาณฮาร์มอนิก แต่ค่าของ $\%THD_v$ แต่ละประเทศมีการกำหนด
แตกต่างกันในทุกระดับแรงดัน

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาหาวิธีการกำหนดมาตรฐานความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของประเทศ
อังกฤษ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี และสวีเดน โดยวิเคราะห์จากขนาด
การลัดวงจร 3 เฟส ในระบบไฟฟ้ากำลัง และขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่มีใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังของ
ทุกประเทศ ซึ่งพบว่าทุกประเทศมีหลักการกำหนดมาตรฐานความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกใกล้เคียงกัน

ผลการศึกษาพบว่า การกำหนดมาตรฐานความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของประเทศที่ได้กล่าว
มาแล้ว ได้จากการพิจารณาจากการวางระบบไฟฟ้ากำลังของแต่ละประเทศนั้น ไม่เหมือนกันทั้ง
ในด้านของระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ระบบส่ง/ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า และขนาดคอนเวอร์เตอร์
ที่มีใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศนั้นๆ

ทรงยศ บุญปั้น
ลายมือชื่อนิติ


ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

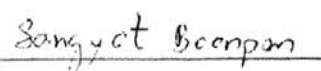
27 / 10.1 / 51

Songyot Boonpan 2008: Determination Methodology of Harmonic Distortion Standards. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Kiatiyuth Kveeyarn, Ph.D. 59 pages.

In this thesis, harmonic distortion standards in power systems of England, France, United States of America, Germany and Sweden are studied. It is found that all of the countries strongly emphasize on %THDv, which is an index to evaluate harmonic quantity. However, the %THDv limits specified in the standards of all countries are different at all voltage levels.

This thesis discovers the determination methodology of harmonic distortion standards of England, France, United States of America, Germany and Sweden. From an analysis of 3-phase short circuit capacity in power systems and power converter sizes used in power systems of each country, the determination methodology of harmonic distortion standards of each country is based on the same procedure.

From the results, the harmonic distortion standard of each country is up to the configuration of power systems, and power converter sizes installed at difference levels of voltage of transmission/distribution systems.


Student's signature

 ๑๗ / ๕ / ๕๑
Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เกียรติยศ กวีญาณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆด้วยดีมาโดยตลอด ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูเกียรติ การะเกตุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ และความช่วยเหลือในทุกๆเรื่อง ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ศุภิต รัตนเพทย ประธานการสอบ และ อาจารย์ ดร.สำเริง อินทามั้ย ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้ให้ความกรุณาในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณพี่ๆ ทีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ช่วยเหลือในเรื่องข้อมูลและให้คำปรึกษาต่างๆ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่คอยช่วยเหลือในเรื่องข้อมูลต่างๆ ขอขอบคุณน้องๆ ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ช่วยเหลือในเรื่องโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และขอขอบคุณทุกๆ กำลังใจที่มีให้ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ พ่อ แม่ และน้องชาย ที่ให้ทุกอย่างแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด จนทุกวันนี้

ทรงยศ บุญปิ่น

มีนาคม 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	12
อุปกรณ์	12
วิธีการ	12
ผลและวิจารณ์	39
ผล	39
วิจารณ์	43
สรุปและข้อเสนอแนะ	45
สรุป	45
ข้อเสนอแนะ	47
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	48
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	60

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ข้อมูลขนาดการลัดวงจร 3 เฟส ประเทศอังกฤษ	13
2	ข้อมูลขนาดการลัดวงจร 3 เฟส ประเทศฝรั่งเศส	14
3	ข้อมูลขนาดการลัดวงจร 3 เฟส ประเทศสหรัฐอเมริกา	14
4	ข้อมูลขนาดการลัดวงจร 3 เฟส ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี	18
5	ข้อมูลขนาดการลัดวงจร 3 เฟส ประเทศสวีเดน	19
6	มาตรฐานแรงดันฮาร์มอนิกประเทศอังกฤษ	19
7	มาตรฐานแรงดันฮาร์มอนิกประเทศฝรั่งเศส	20
8	มาตรฐานแรงดันฮาร์มอนิกประเทศสหรัฐอเมริกา	20
9	มาตรฐานกระแสฮาร์มอนิกประเทศสหรัฐอเมริกา ที่แรงดันน้อยกว่า 69 kV	20
10	มาตรฐานกระแสฮาร์มอนิกประเทศสหรัฐอเมริกา ที่แรงดันระหว่าง 69-161 kV	21
11	มาตรฐานกระแสฮาร์มอนิกประเทศสหรัฐอเมริกา ที่แรงดันมากกว่า 161 kV	21
12	มาตรฐานแรงดันฮาร์มอนิกประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี	21
13	มาตรฐานแรงดันแต่ละฮาร์มอนิกประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี	22
14	มาตรฐานแรงดันฮาร์มอนิกประเทศสวีเดน	22
15	แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกประเทศอังกฤษ	23
16	แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกประเทศฝรั่งเศส	23
17	แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกประเทศสหรัฐอเมริกา	24
18	แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี	27
19	แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกประเทศสวีเดน	27
20	อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง ตามมาตรฐาน IEC 76-5	28

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
21	ขนาดคอนเวอร์เตอร์ใหญ่ที่สุดที่ %THD _v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด ประเทศ อังกฤษ	32
22	ขนาดคอนเวอร์เตอร์ใหญ่ที่สุดที่ %THD _v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด ประเทศ ฝรั่งเศส	33
23	ขนาดคอนเวอร์เตอร์ใหญ่ที่สุดที่ %THD _v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด ประเทศ สหรัฐอเมริกา	33
24	ขนาดคอนเวอร์เตอร์ใหญ่ที่สุดที่ %THD _v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด ประเทศ สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี	37
25	ขนาดคอนเวอร์เตอร์ใหญ่ที่สุดที่ %THD _v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด ประเทศ สวีเดน	38
26	เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกแบบ 6 พัลส์ ตามมาตรฐาน IEC IEEE กับ EDF	43

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงจุดต่อร่วม (PCC)	3
2	วงจรไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ที่มีภาระเป็นเชิงเส้น	5
3	วงจรไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ที่มีภาระไม่เป็นเชิงเส้น	6
4	การแปลงผันพลังงานระหว่างรูปแบบต่างๆ ทางไฟฟ้า	8
5	คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิด 6 พัลส์	9
6	เดาหลอมโลหะแบบ AC	10
7	เดาหลอมโลหะแบบ DC	11
8	แบบจำลองการต่อวงจรภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้น	29
9	ไดอะแกรมเส้นเคียวของแบบจำลองการต่อวงจรของภาระไม่เป็นเชิงเส้น	31

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

PCC	=	จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling)
V_{rms}	=	ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยประสิทธิภาพของแรงดันรวม
I_h	=	กระแสไฟฟ้าฮาร์โมนิกที่ลำดับต่างๆ
%THDv	=	ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวม
MVA_{SC}	=	ขนาดการลัดวงจร 3 เฟส (Short Circuit Capacity)
x/r ratio	=	อัตราส่วนอินดักแตนซ์ต่อรีซิสแตนซ์
IEC	=	มาตรฐานยุโรป (International Electrotechnical Commission)
IEEE	=	มาตรฐานประเทศสหรัฐอเมริกา (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
EDF	=	มาตรฐานประเทศฝรั่งเศส (Electricité de France)

วิธีการกำหนดมาตรฐานความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก

Determination Methodology of Harmonic Distortion Standards

คำนำ

ปัจจุบันคุณภาพกำลังไฟฟ้าเป็นที่สนใจอย่างมากในกลุ่มวิศวกรไฟฟ้ากำลัง ซึ่งประกอบไปด้วยหลายส่วนเช่นแรงดันตก แรงดันเกิน แรงดันกระเพื่อมและฮาร์มอนิกเป็นต้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเรื่องฮาร์มอนิก ซึ่งหลายประเทศได้ให้ความสนใจและศึกษารวมทั้งได้กำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับการจำกัดระดับฮาร์มอนิกไม่ให้มีมากเกินไปในระบบไฟฟ้า งานวิจัยนี้ทำการศึกษาข้อมูลระบบไฟฟ้าและมาตรฐานฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าของประเทศอังกฤษ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันนี และสวีเดน ซึ่งสาเหตุที่ทำการศึกษามาตรฐานฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศต่างๆ ที่กล่าวมานั้น เนื่องจากประเทศต่างๆที่กล่าวมานั้นมีการกำหนดมาตรฐานฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังขึ้นมาใช้เอง ซึ่งมีความแตกต่างกัน

การศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลของประเทศต่างๆดังกล่าวมาแล้วนั้นได้พิจารณาค่าขนาดการลัดวงจรของระบบไฟฟ้าในแต่ละระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อนำมาศึกษาเปรียบเทียบกับขนาดการลัดวงจรของแต่ละประเทศมีผลอย่างไรต่อการกำหนดมาตรฐานระดับฮาร์มอนิก รวมถึงศึกษามาตรฐานฮาร์มอนิกของประเทศอังกฤษ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันนี และสวีเดน

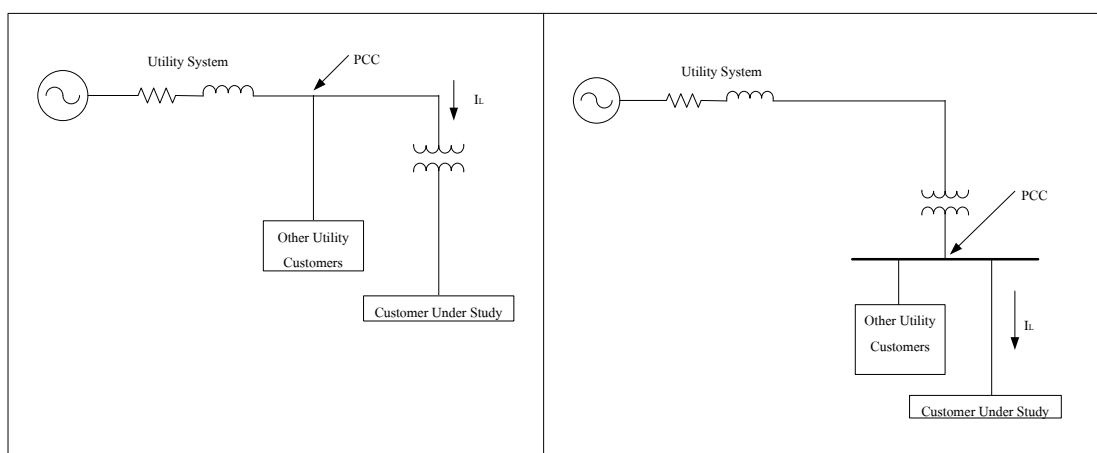
วัตถุประสงค์

1. ศึกษามาตรฐานฮาร์โมนิกของประเทศอังกฤษ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันนี และสวีเดน
2. ศึกษาถึงวิธีการการกำหนดมาตรฐานความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกของประเทศอังกฤษ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันนี และสวีเดน
3. ศึกษาถึงที่มาของการกำหนดมาตรฐานฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศ อังกฤษ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันนี และสวีเดน

การตรวจเอกสาร

พื้นฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์โมนิก

พลังงานไฟฟ้า เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่มีความสำคัญมากในปัจจุบัน พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่แปรรูปมาจากแหล่งพลังงานอื่นๆ มากมายหลายชนิด เช่น พลังงานน้ำ พลังงานจากเชื้อเพลิงต่างๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน ลิกไนต์ เป็นต้น โดยทั่วไปเรานำพลังงานเหล่านี้ไปผ่านกระบวนการเพื่อนำมาหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสลับที่มีรูปคลื่นสัญญาณเป็นรูปคลื่นไซน์ โดยมีขนาดและความถี่ตามที่ผู้ผลิตกำหนดขึ้น ซึ่งความถี่ที่ใช้กันทั่วโลกอยู่ 2 ค่าหลักๆ ได้แก่ ความถี่ 50 และ 60 เฮิร์ตซ์ โดยที่ประเทศไทยได้ใช้ความถี่ที่ 50 เฮิร์ตซ์ ความถี่รูปคลื่นไซน์ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตออกมาได้ เรียกว่า ความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) จากนั้นขนาดของแรงดันอาจถูกปรับเปลี่ยนเป็นขนาดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมในการส่งพลังงานไฟฟ้าไปใช้ในจุดต่างๆ ที่ต้องการใช้งาน โดยที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling: PCC) ต้องเป็นแรงดันที่ไม่ผิดเพี้ยนไปจากแรงดันรูปคลื่นไซน์ ซึ่งภาพที่ 1 เป็นการแสดงจุดต่อร่วมระหว่างผู้ขายไฟฟ้ากับผู้ซื้อไฟฟ้า (วิบูลย์, 2549)



ภาพที่ 1 แสดงจุดต่อร่วม (PCC)

ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น

ในระบบการผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับในอุดมคตินั้น ค่าของแรงดันและความถี่ ณ จุดใช้งานใดๆ ต้องมีค่าคงที่และมีรูปคลื่นของสัญญาณแรงดันไม่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ที่กำหนดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความถี่รูปคลื่นไซน์ที่มีค่าคงที่ตามที่กำเนิดออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้เรียกว่า ความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) แต่ในทางปฏิบัตินั้นมีความเป็นไปได้ยากที่ค่าแรงดัน ค่าความถี่ และรูปร่างของคลื่นสัญญาณแรงดันมีความคงที่ได้เนื่องจากผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุทางไฟฟ้าที่แฝงอยู่ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า รวมทั้งผลที่เกิดจากภาระทางไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) เป็นผลทำให้รูปคลื่นแรงดันเกิดความผิดเพี้ยน (Distortion) ไปจากรูปคลื่นไซน์ ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบกำเนิดและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ ด้วย แรงดันหรือกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่มีลักษณะรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์เกิดขึ้นได้เนื่องจากมีปริมาณของกระแสหรือแรงดันที่มีความถี่อื่นๆ ปะปนมาด้วย ความถี่ที่ปะปนเข้ามาสามารถแบ่งออก 3 ประเภท ตามลักษณะนิยามของค่าความถี่ได้แก่ ความถี่ฮาร์มอนิก (Harmonic frequency) ความถี่ซับฮาร์มอนิก (Subharmonic frequency) และความถี่อินเตอร์ฮาร์มอนิก (Interharmonic frequency) (วิบูลย์, 2541)

1. ความถี่ฮาร์มอนิก (Harmonic frequency)

ความถี่ฮาร์มอนิกหมายถึง ค่าความถี่ของรูปคลื่นไซน์ที่มีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่าของค่าความถี่มูลฐาน ตัวอย่างเช่นถ้าความถี่มูลฐานของรูปคลื่นมีค่าเท่ากับ 50 เฮิรตซ์ และความถี่ของปริมาณหนึ่งๆมีค่าเท่ากับ 100 เฮิรตซ์ เรียกค่าความถี่ของปริมาณนั้นว่า ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 ดังนั้นลำดับฮาร์มอนิกต่างๆของปริมาณสามารถหาได้จากสมการ (วิบูลย์, 2549)

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (1)$$

เมื่อ h คือ ลำดับฮาร์มอนิก
 f_h คือ ค่าความถี่ฮาร์มอนิก
 f_1 คือ ค่าความถี่มูลฐาน

2 ความถี่ซับฮาร์โมนิก (Subharmonic frequency)

ความถี่ซับฮาร์โมนิก หมายถึงค่าความถี่ของรูปคลื่นไซน์ที่มีค่าต่ำกว่าความถี่มูลฐาน เช่น เมื่อกำหนดให้ความถี่มูลฐานมีค่าเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ ดังนั้นถ้าความถี่ของปริมาณนั้นที่มีค่าต่ำกว่า 50 เฮิร์ตซ์ เรียกว่าความถี่ซับฮาร์โมนิก (วิบูลย์, 2549)

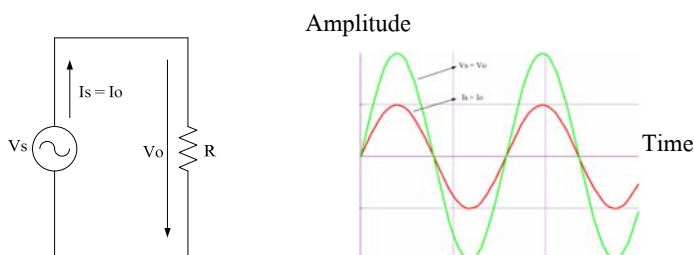
3 ความถี่อินเตอร์ฮาร์โมนิก (Interharmonic frequency)

ความถี่อินเตอร์ฮาร์โมนิก หมายถึงค่าความถี่ของรูปคลื่นไซน์ที่มีค่าสูงกว่าค่าความถี่มูลฐาน โดยมีค่าที่ไม่เป็นจำนวนเต็มเท่าของค่าความถี่มูลฐาน เช่น ถ้ารูปคลื่นสัญญาณมีความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ ดังนั้นความถี่ของปริมาณนั้นๆ ที่มีค่าสูงกว่า 50 เฮิร์ตซ์ และมีค่าไม่เป็นจำนวนเต็มเท่าของค่าความถี่มูลฐาน เรียกว่าความถี่อินเตอร์ฮาร์โมนิก เช่น 60 เฮิร์ตซ์ 75 เฮิร์ตซ์ 80 เฮิร์ตซ์ เป็นต้น (วิบูลย์, 2549)

ภาระของระบบไฟฟ้า

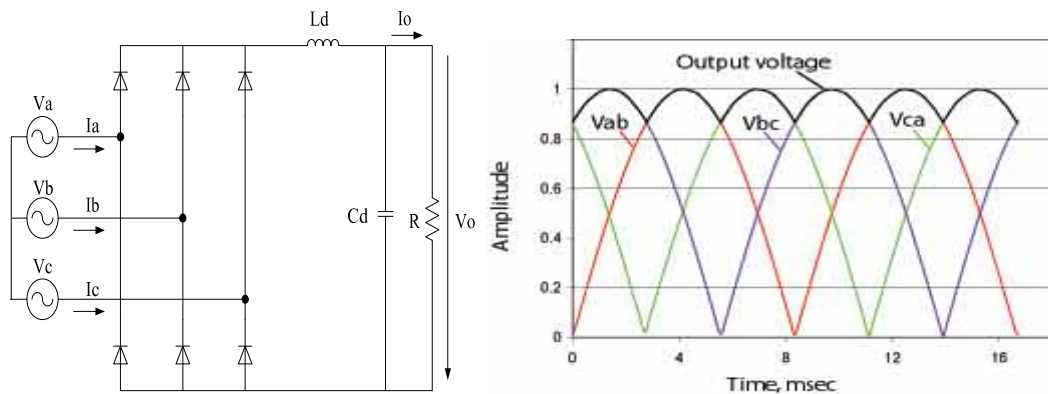
ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันจากรูปคลื่นไซน์ ซึ่งทั่วไปแสดงในรูปแบบของ ฮาร์โมนิกโดยที่สาเหตุหลักของการเกิดความผิดเพี้ยนนี้มาจากภาระทางไฟฟ้าที่ต่ออยู่ในระบบไฟฟ้า ซึ่งภาระแต่ละชนิดมีคุณลักษณะสมบัติแตกต่างกันออกไป โดยแบ่งเป็น 2 แบบคือ

1. ภาระที่มีคุณลักษณะสมบัติเป็นเชิงเส้น (Linear Load) คืออุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ขณะทำงานในช่วงเวลาคงตัว (Steady State) มีค่าความต้านทานของภาระคงที่ตลอดคาบเวลาของรูปคลื่นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเช่น ค่าความต้านทาน ค่าเหนี่ยวนำ และค่าเก็บประจุ โดยภาพที่ 2 แสดงวงจรไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ที่มีภาระเป็นเชิงเส้น



ภาพที่ 2 วงจรไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ที่มีภาระเป็นเชิงเส้น

2. ภาระที่มีคุณลักษณะสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) คืออุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่มีรูปร่างของคลื่นกระแสไฟฟ้าไม่ต่อเนื่อง หรือมีค่าความต้านทานของการเปลี่ยนแปลงตามรูปร่างของคลื่นแรงดันทางแหล่งจ่าย เช่นภาระประเภทคอนเวอร์เตอร์ และภาระประเภทอิเล็กทรอนิกส์ โดยภาพที่ 3 แสดงวงจรไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ที่มีภาระไม่เป็นเชิงเส้น (วิบูลย์, 2549)



ภาพที่ 3 วงจรไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ที่มีภาระไม่เป็นเชิงเส้น

ดัชนีชี้วัดปริมาณฮาร์มอนิก

เมื่อพิจารณาในกรณีที่แรงดันไฟฟ้ามีลักษณะรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ นั่นคือคลื่นประกอบด้วยสัญญาณไซน์ที่มีความถี่มูลฐานและความถี่ที่เรียกว่าฮาร์มอนิกนั้น วิธีการวิเคราะห์เพื่อหาค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่สำคัญและนิยามของค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่มีเพิ่มเติมจากการเกิดแรงดันฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าสามารถกำหนดคุณลักษณะและรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้ (วิบูลย์, 2549)

1. ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยประสิทธิผลของแรงดันรวม (True RMS voltage)

$$V_{rms} = \sqrt{V_1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} \quad (2)$$

เมื่อ V_{rms} คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยประสิทธิผลของแรงดันรวม

V_h คือ ขนาดแรงดันที่มีความถี่ฮาร์มอนิก h

V_1 คือ ขนาดแรงดันที่ความถี่มูลฐาน
 h คือ ลำดับฮาร์มอนิก

2. ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวม (Total harmonic distortion, THD) คืออัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสองของค่า RMS ของส่วนประกอบฮาร์มอนิกกับค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่มูลฐานเทียบเป็นร้อยละดังสมการ (วินูลย์, 2541)

$$\%THD_x = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} X_h^2}}{X_1} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ X สามารถแทนด้วย V ถ้าเป็นแรงดัน หรือ I ถ้าเป็นกระแส

3. สมการการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกของคอนเวอร์เตอร์ตามมาตรฐาน IEC 1000-3-6 และ IEEE Standards 519-1992 มีดังนี้

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (4)$$

เมื่อ I_h คือ กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ลำดับ h หน่วย แอมแปร์
 I_1 คือ กระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน หน่วย แอมแปร์
 h คือ ลำดับฮาร์มอนิก

4. สมการการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกของคอนเวอร์เตอร์ตามมาตรฐานประเทศฝรั่งเศส (Electricité de France, EDF) (P.Meynaud, 1981) มีดังนี้

$$I_h = \frac{I_1}{\left(h - \frac{5}{h}\right)^{1.2}} \quad (5)$$

เมื่อ I_h คือ กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ลำดับ h หน่วย แอมแปร์
 I_1 คือ กระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน หน่วย แอมแปร์
 h คือ ลำดับฮาร์มอนิก

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดจากหลายสาเหตุด้วยกัน ซึ่งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกสามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

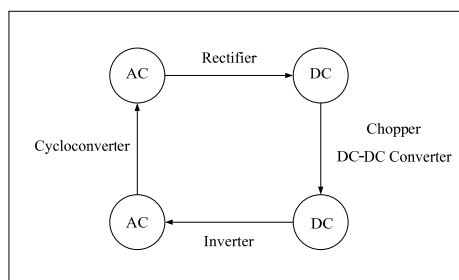
1. ฮาร์มอนิกถาวรที่เกิดจากอุปกรณ์และเครื่องใช้ไฟฟ้าซึ่งเป็นภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้น ได้แก่

- เเรคตีไฟเออร์
- เเรคตีไฟเออร์แบบมีการควบคุม
- คอนเวอร์เตอร์กำลังสถิต
- รีแอกเตอร์แบบอิ่มตัว
- เตาหลอมแบบอาร์ค
- เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ค
- หลอดฟลูออเรสเซนต์

1.1 คอนเวอร์เตอร์กำลังสถิต (Static Power Converter)

สาเหตุหลักในการกำเนิดฮาร์มอนิกถาวรที่พบมากในปัจจุบันได้แก่อุปกรณ์จำพวกคอนเวอร์เตอร์กำลังสถิต ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประเภทเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงหรือในทางกลับกันเปลี่ยนจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้ (วิบูลย์, 2549)

- เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier)
- เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยการควบคุมเฟส (DC Chopper)
- เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter)
- เปลี่ยนความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ (Cycloconverter)



ภาพที่ 4 การแปลงผันพลังงานระหว่างรูปแบบต่างๆทางไฟฟ้า

เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง จึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมและบ้านเรือนที่อยู่อาศัย ซึ่งกระแสฮาร์มอนิกที่ถูกกำเนิดโดยคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบสถิต นั้นมีรายละเอียดขึ้นกับ

- รูปแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสลับที่เข้าของคอนเวอร์เตอร์
- รูปแบบทางโครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์
- รูปแบบของการควบคุม
- ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ากระแสสลับและค่าพารามิเตอร์ทางด้านวงจร

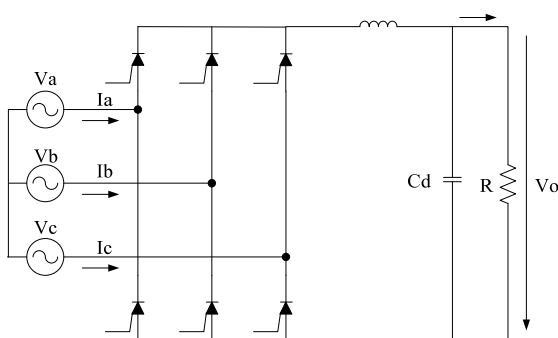
กระแสดรง

อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

1.1.1 คอนเวอร์เตอร์ขนาดเล็ก (Small Power Converter) ใช้กับไฟฟ้าระบบเฟสเดียวเป็นส่วนใหญ่โดยใช้กับอุปกรณ์จำพวก

- ระบบโทรทัศน์
- คอมพิวเตอร์
- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในบ้าน
- เครื่องปรับอากาศ

1.1.2 คอนเวอร์เตอร์ขนาดปานกลาง (Medium Power Converter) หมายถึงคอนเวอร์เตอร์ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 10-1000 กิโลวัตต์ ได้รับความนิยมในกลุ่มงานอุตสาหกรรมที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูงโดยส่วนมากแล้วใช้ไฟฟ้าระบบ 3 เฟส ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์กำลัง เช่นการใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ และการใช้เกตเทิร์นออฟไทรสเตอร์ (GTO) ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแสดงดังภาพที่ 5 ส่วนใหญ่เป็นคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ และเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกชนิดอื่นๆ ในพิกัดเดียวกัน ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเฉพาะคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ (วิบูลย์, 2549)



ภาพที่ 5 คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิด 6 พัลส์

คอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์นี้ ประกอบด้วยฮาร์มอนิกลำดับที่ 5, 7, 11, 13, 17, 19, ... หรือสามารถคำนวณหาลำดับฮาร์มอนิกได้จาก (วินูลย์, 2549)

$$h = 6k \pm 1$$

เมื่อ h คือ ลำดับฮาร์มอนิก

k คือ จำนวนนับเต็มบวกที่เริ่มจาก 1, 2, 3, ...

1.1.3 คอนเวอร์เตอร์ที่มีกำลังขนาดใหญ่ (Large Power Converter) หมายถึง

คอนเวอร์เตอร์ที่มีขนาดกำลังวัตต์สูงเป็นเมกกะวัตต์ ส่วนใหญ่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก และการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูงแบบกระแสตรง เป็นต้นโดยแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกโดยหลักๆ แล้วอยู่ในรูปแบบของเรกติไฟเออร์แบบควบคุมเฟส (Phase angle controlled rectifier) และอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ส่วนใหญ่เป็นคอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์ ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์นี้ ประกอบด้วยฮาร์มอนิกลำดับที่ 11, 13, 23, 25, ... หรือสามารถคำนวณหาลำดับฮาร์มอนิกได้จาก (วินูลย์, 2549)

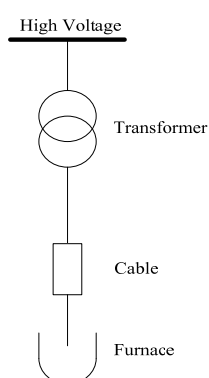
$$h = 12k \pm 1$$

เมื่อ h คือ ลำดับฮาร์มอนิก

k คือ จำนวนนับเต็มบวกที่เริ่มจาก 1, 2, 3, ...

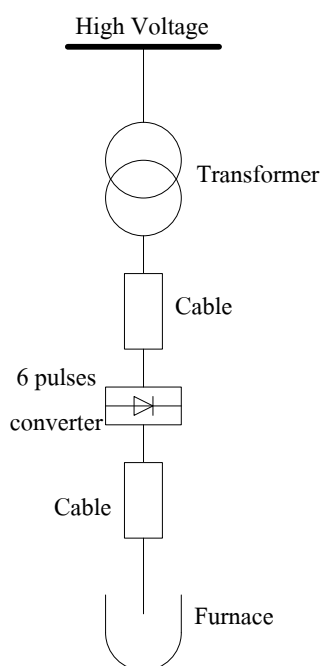
1.1.4 เตาหลอมโลหะแบบ AC (AC Electric Arc Furnace) เตาหลอมโลหะแบบ

AC นี้เป็นกระแบบไม่เป็นเชิงเส้น ที่ไม่สมมาตร และไม่เสถียรภาพ โดยกำเนิดฮาร์มอนิกที่มีทั้งลำดับคู่และลำดับคี่ โดยภาพที่ 6 แสดงการต่อวงจรเตาหลอมโลหะแบบ AC (วินูลย์, 2549)



ภาพที่ 6 เตาหลอมโลหะแบบ AC

1.1.5 เตาหลอมโลหะแบบ DC (DC Electric Arc Furnace) เตาหลอมโลหะแบบ DC นี้ ใช้การอาร์คผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์ และมีเสถียรภาพมากกว่าเตาหลอมโลหะแบบ AC และ ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นก็มีลักษณะเดียวกับคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ โดยภาพที่ 7 แสดงการต่อวงจร เตาหลอมโลหะแบบ DC (วิบูลย์, 2549)



ภาพที่ 7 เตาหลอมโลหะแบบ DC

2. เกิดจากการทำงานของระบบไฟฟ้า ได้แก่

- แหล่งกำเนิดที่เฟสไม่สมดุล (Phase Unbalance Sources) เช่น หม้อแปลงแบบ

Open-Delta

- การเกิดอำนาจแม่เหล็กของหม้อแปลงที่ไม่เป็นเชิงเส้น
- การเกิดเรโซแนนแบบอนุกรมหรือขนาน เนื่องจากตัวเก็บประจุที่ต่อใช้อยู่ใน

ระบบไฟฟ้ากำลัง

3. เกิดจากแหล่งกำเนิดภายนอกเป็นแหล่งกำเนิดชนิดชั่วคราว ได้แก่

- สวิตช์ระเบิด
- ไฟฟ้า

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

วัสดุอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับทำวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows XP
3. โปรแกรม Microsoft Office 2003 (Words, Excel, Power Point)
4. โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ข้อมูลเชิงวิศวกรรม คณิตศาสตร์ MATLAB version 7 ในวิทยานิพนธ์นำมาใช้เขียนโปรแกรมหาขนาดคอนเวอร์เตอร์และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดรวม
5. โปรแกรม Internet Explorer ใช้ในการหาข้อมูลขนาดการลัดวงจรของประเทศต่างๆ
6. เครื่องคำนวณทางวิศวกรรม
7. เครื่อง Printer และอื่นๆ

วิธีการ

วิทยานิพนธ์นี้เริ่มต้นจากการเก็บรวบรวมข้อมูลดังต่อไปนี้

- 1 ขนาดการลัดวงจร 3 เฟส (Short Circuit Capacity) ทำให้รู้ถึงค่าอิมพีแดนซ์ภายในระบบ
- 2 ระดับแรงดันต่างๆที่เกิดการลัดวงจร 3 เฟส
- 3 ค่ารีแอคแตนซ์ต่อค่ารีซิสแตนซ์ของระบบ (x/r ratio system)
- 4 ค่ารีแอคแตนซ์ต่อค่ารีซิสแตนซ์ของหม้อแปลง (x/r ratio transformer)
- 5 ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่อที่จุด PCC
- 6 มาตรฐานฮาร์โมนิกของประเทศต่างๆ
- 7 ขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ต่ออยู่ในระบบไฟฟ้า

แหล่งที่มาและข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูลที่ได้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ได้มาจากการอ่านบทความต่างประเทศต่างๆ เช่น

บทความจาก IEEE, CIGRE และ IEE รวมถึงบทความต่างๆ ที่หาได้จากอินเทอร์เน็ต โดยหาข้อมูลของประเทศอังกฤษ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันนี และสวีเดน

ข้อมูลที่น่ามาประกอบการวิจัย ประกอบด้วย

1. ข้อมูลขนาดการลัดวงจร 3 เฟส

ตารางที่ 1 ข้อมูลขนาดการลัดวงจร 3 เฟส ประเทศอังกฤษ

ประเทศ	รัฐ/เมือง	การไฟฟ้าที่รับผิดชอบ	Voltage (kV)	MVA _{sc}	Z (Ohm)
England	Achill Island	Utility	10.8	6.9	16.904
England	Scotland	Irvine	11	762.1	0.1588
England	ไอร์แลนด์	Electric Utility	11	250	0.4850
England	ไอร์แลนด์	Utility	11	200	0.6050
England	Achill Island	Utility	21	26.4	16.705
England	ไอร์แลนด์	Electricity	33	600	1.8150
England	ไอร์แลนด์	Artfield Fell wind farm	33	389	2.7990
England	Wales	Manweb distribution	33	78	13.962
England	ไอร์แลนด์	Electricity Supply Company	33	20	54.450
England	Ireland	Northern Ireland Electricity	110	4382	2.7610
England	ไอร์แลนด์	Hadyard Hill wind farm	132	1582	11.014
England	ไอร์แลนด์	Folkestone	132	800	21.780
England	ไอร์แลนด์	Asfordby	132	565	30.839
England	Ireland	Northern Ireland Electricity	220	5060	9.5650
England	Sellindge	ไอร์แลนด์	400	6000	26.667
England	North London	East Claydon Substation	400	4000	40.000

ที่มา: Beech (1998); Taylor (1998); Savolac (1998); Baker (1991); Smith (2005); Haslam (1999)

ตารางที่ 2 ข้อมูลขนาดการลัดวงจร 3 เฟส ประเทศฝรั่งเศส

ประเทศ	รัฐ/เมือง	การไฟฟ้าที่รับผิดชอบ	Voltage (kV)	MVA _{sc}	Z (Ohm)
France	ไม่ระบุ	EDF	63	400	9.9225
France	ไม่ระบุ	EDF	90	400	20.25
France	ไม่ระบุ	EDF	225	1500	33.75
France	Les Mandarins	ไม่ระบุ	400	11700	13.675

ที่มา: Pouliquen *et al* (1993); Finn (1991)

ตารางที่ 3 ข้อมูลขนาดการลัดวงจร 3 เฟส ประเทศสหรัฐอเมริกา

ประเทศ	รัฐ/เมือง	การไฟฟ้าที่รับผิดชอบ	Voltage (kV)	MVA _{sc}	Z (Ohm)
USA	ไม่ระบุ	Utility	4.16	123.57	0.14
USA	ไม่ระบุ	Utility	4.16	121.518	0.142
USA	ไม่ระบุ	Utility	4.16	116.459	0.1486
USA	ไม่ระบุ	Utility	4.16	115.96	0.149
USA	ไม่ระบุ	Utility	4.16	113.91	0.152
USA	ไม่ระบุ	Utility	4.16	109.33	0.158
USA	ไม่ระบุ	Utility	4.16	107.76	0.16
USA	ไม่ระบุ	Utility	4.16	104.72	0.165
USA	ไม่ระบุ	Utility	4.16	103.195	0.168
USA	ไม่ระบุ	Utility	4.16	99.59	0.1737
USA	ไม่ระบุ	Utility	4.16	98.26	0.176
USA	ไม่ระบุ	Utility	4.16	95.33	0.182
USA	ไม่ระบุ	Utility	4.16	94.03	0.184
USA	ไม่ระบุ	Utility	4.16	94.109	0.184

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ประเทศ	รัฐ/เมือง	การไฟฟ้าที่รับผิดชอบ	Voltage (kV)	MVA _{sc}	Z (Ohm)
USA	ไม่ว่ารัฐ	Utility	4.16	92.83	0.186
USA	Nebraska	ไม่ว่ารัฐ	12.47	224.367	0.693
USA	ไม่ว่ารัฐ	ไม่ว่ารัฐ	12.47	126.9	1.225
USA	Colorado	ไม่ว่ารัฐ	12.47	113.63	1.368
USA	Nebraska	ไม่ว่ารัฐ	12.47	66.09	2.353
USA	ไม่ว่ารัฐ	Amerada Hess Corporation	12.5	19.49	8.02
USA	ไม่ว่ารัฐ	Cascade Creek Substation	13.8	2460	0.077
USA	ไม่ว่ารัฐ	Zumbro River Substation	13.8	2460	0.077
USA	Massachusetts	ไม่ว่ารัฐ	13.8	1001	0.19
USA	ไม่ว่ารัฐ	Luke Mill	13.8	1000	0.19
USA	Alabama	ไม่ว่ารัฐ	13.8	523	0.364
USA	Ohio	ไม่ว่ารัฐ	13.8	500	0.381
USA	New Orleans	ไม่ว่ารัฐ	13.8	358.53	0.531
USA	Texas	ไม่ว่ารัฐ	13.8	301.41	0.632
USA	Minnesota	Hibbing	23	556	0.9514
USA	Kansas	W. Stadium	34.5	159.01	7.485
USA	Kansas	NEKSU	34.5	144.37	8.244
USA	Kansas	Matter Corner	34.5	120.65	9.865
USA	Kansas	Stagg Hill	34.5	119.69	9.94
USA	Utah	ไม่ว่ารัฐ	46	1000	2.116
USA	New York	ไม่ว่ารัฐ	69	600	7.935
USA	New York	ไม่ว่ารัฐ	115	5577	2.37
USA	ไม่ว่ารัฐ	Harborton	115	5000	2.645

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ประเทศ	รัฐ/เมือง	การไฟฟ้าที่รับผิดชอบ	Voltage (kV)	MVA _{sc}	Z (Ohm)
USA	ไม่ว่ารัฐ	Rhode Island	115	4400	3.0057
USA	Oregon	McNary	115	4400	3.0057
USA	Oregon	Big Eddy	115	4100	3.2256
USA	ไม่ว่ารัฐ	Graham Rd. Substation	115	2437	5.427
USA	ไม่ว่ารัฐ	Ice Habour	115	2300	5.75
USA	Washington	Grand Coulee	115	2200	6.0114
USA	ไม่ว่ารัฐ	Bonn	115	2100	6.2976
USA	Highgate	Highgate(West)	115	480	27.552
USA	New York	Chateauguay	120	7600	1.895
USA	ไม่ว่ารัฐ	Hydro-Quebec	120	520	27.69
USA	Highgate	Highgate(East)	120	420	34.286
USA	California	Willow Glen substaion	138	15536	1.226
USA	Virginia	Matt Funk Substation	138	4977.6	3.826
USA	ไม่ว่ารัฐ	Port Alberni	138	1900	10.0232
USA	Kentucky	Inez Substation	138	1300	14.65
USA	Wisconsin	ไม่ว่ารัฐ	161	2407	10.77
USA	Wisconsin	ไม่ว่ารัฐ	161	1913	13.55
USA	New Orleans	Gypsy	230	21576	2.45
USA	Washington	Grand Coulee	230	20750	2.5494
USA	New Orleans	Gypsy	230	18015	2.94
USA	Oregon	Big Eddy	230	15700	3.3694
USA	New Orleans	Gypsy	230	15664	3.38
USA	ไม่ว่ารัฐ	Wanapun	230	14800	3.5743
USA	Washington	Chief Joseph	230	14400	3.6736

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ประเทศ	รัฐ/เมือง	การไฟฟ้าที่รับผิดชอบ	Voltage (kV)	MVA _{sc}	Z (Ohm)
USA	California	RIVER ROCK SUB.	230	13750	3.8473
USA	New Orleans	Gypsy	230	13568	3.89
USA	New Orleans	Gypsy	230	12203	4.33
USA	New Orleans	Gypsy	230	10196	5.19
USA	Oregon	Trojan	230	10000	5.29
USA	Oregon	McNary	230	9300	5.6882
USA	California	Willow Glen substaion	230	7967	6.639
USA	Berkeley	Nucor Stell	230	5000	10.58
USA	Ontario	Ontario Hydro power grid	230	3750	14.107
USA	New Maxico	New Maxico (East)	230	2020	26.188
USA	ไนเอร์บุ	Eddy County Substation	230	2000	26.45
USA	Sidney	Sidney (East)	230	1720	30.756
USA	New England	Comerford Station	230	1587	33.333
USA	Sidney	Sidney (West)	230	1040	50.865
USA	Miles City	Miles City (East)	230	550	96.18
USA	Miles City	Miles City (West)	230	400	132.25
USA	New York	Marcy Substation	345	17000	7
USA	New Maxico	New Maxico (West)	345	740	160.845
USA	Washington	Grand Coulee	500	28000	8.9285
USA	ไนเอร์บุ	NPR	500	25200	9.9206
USA	Oregon	John Day	500	23000	10.8696
USA	Washington	Chief Joseph	500	20750	12.0482
USA	Washington	Lo.Mo.	500	19000	13.1579
USA	Oregon	Slatt substation	500	17580	14.22

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ประเทศ	รัฐ/เมือง	การไฟฟ้าที่รับผิดชอบ	Voltage (kV)	MVA _{sc}	Z (Ohm)
USA	Washington	Little Goose	500	17200	14.5349
USA	California	Willow Glen substaion	500	12990	19.245

ที่มา: Moghbelli *et al* (1993); Engelman *et al* (1991); Sottiele *et al* (2005); Malmedal *et al* (2004); Hoevenaar *et al* (2003); Currence *et al* (1995); Medora (1995); Pahwa and Ward (1992); Hartmann and Wohlgemuth (1977); Thallam (1992); Mendis *et al* (1994); Le Tang (1997); Tyll *et al* (1994); Piwko *et al* (1994); Renz *et al* (1998)

ตารางที่ 4 ข้อมูลขนาดการลัดวงจร 3 เฟส ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี

ประเทศ	รัฐ/เมือง	การไฟฟ้าที่รับผิดชอบ	Voltage (kV)	MVA _{sc}	Z (Ohm)
Germany	ไม์ระนู	MEAG	20	350	1.143
Germany	West Berlin	Bewag	30	3614	0.249
Germany	ไม์ระนู	German Utility	110	7506.7	1.612
Germany	ไม์ระนู	Rosend	110	6001.6	2.02
Germany	ไม์ระนู	Karnap	110	6001.6	2.02
Germany	ไม์ระนู	MEAG	110	5000	2.42
Germany	West Berlin	Bewag	110	3614	3.348
Germany	ไม์ระนู	German Utility	220	22443.9	2.156
Germany	ไม์ระนู	German Utility	380	45216.9	3.193
Germany	ไม์ระนู	Etzenricht Substation	420	6000	29.4

ที่มา: Stade *et al* (2002); Bechtold (1998); Neumann (1998); Gampenrieder *et al* (1994)

ตารางที่ 5 ข้อมูลขนาดการลัดวงจร 3 เฟส ประเทศสวีเดน

ประเทศ	รัฐ/เมือง	การไฟฟ้าที่รับผิดชอบ	Voltage (kV)	MVA _{sc}	Z (Ohm)
Sweden	Alsvik	ไม่ระบุ	10	11	9.091
Sweden	Hjartholmen	ไม่ระบุ	10.5	55	2.005
Sweden	Bockstigen	ไม่ระบุ	10.5	31.55	3.49
Sweden	Utility	ไม่ระบุ	12	457	0.315
Sweden	Morarp	ไม่ระบุ	130	4007.9	4.22
Sweden	Soderasen	ไม่ระบุ	130	1576.2	10.72
Sweden	Utility	ไม่ระบุ	132	4000	4.356
Sweden	Hagfors	Uddeholm Tooling	132	1000	17.424
Sweden	Stockholm	ไม่ระบุ	220	11000	4.4
Sweden	Utility	ไม่ระบุ	400	7500	21.333
Sweden	Lindome	ไม่ระบุ	400	1000	160

ที่มา: Thiringer (2004); Bollen (2003); Einarsson (1994); Grunbaum (2000); Sorensen (2004)

2. ข้อมูลมาตรฐานฮาร์โมนิกของประเทศอังกฤษ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา สหพันธ์ สาธารณรัฐเยอรมันนี และสวีเดน

ตารางที่ 6 มาตรฐานแรงดันฮาร์โมนิกประเทศอังกฤษ

Voltage Level	THD _v (%)
Low Voltage	5.0
Medium Voltage	5.0
Very High Voltage	1.5

ที่มา: Katic (1994)

ตารางที่ 7 มาตรฐานแรงดันฮาร์โมนิกประเทศฝรั่งเศส

Condition	THDv (%)
One harmonic source only connected at PCC	1.6
Odd harmonic	1.0
Even harmonic	0.6

ที่มา: Katic (1994)

ตารางที่ 8 มาตรฐานแรงดันฮาร์โมนิกประเทศสหรัฐอเมริกา

Voltage Level	Individual Harmonics Distortion (%)	THDv (%)
$V < 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 < V < 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$V > 161 \text{ kV}$	1.0	1.0

ที่มา: Halpin (2005)

ตารางที่ 9 มาตรฐานกระแสฮาร์โมนิกประเทศสหรัฐอเมริกา ที่แรงดันน้อยกว่า 69 kV

I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$h > 35$	THDi
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20 - 50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50 - 100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100 - 1000	12	5.5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2.5	1.4	20

ที่มา: Halpin (2005)

ตารางที่ 10 มาตรฐานกระแสฮาร์โมนิกประเทศสหรัฐอเมริกา ที่แรงดันระหว่าง 69-161 kV

I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$h > 35$	THDi
< 20	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
20 - 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4
50 - 100	5	2.25	2	0.75	0.35	6
100 - 1000	6	2.75	2.5	1	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3	1.25	0.7	10

ที่มา: Halpin (2005)

ตารางที่ 11 มาตรฐานกระแสฮาร์โมนิกประเทศสหรัฐอเมริกา ที่แรงดันมากกว่า 161 kV

I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$h > 35$	THDi
< 50	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

ที่มา: Halpin (2005)

ตารางที่ 12 มาตรฐานแรงดันฮาร์โมนิกประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน

Voltage Level	THDv (%)
All Level	10

ที่มา: Katic (1994)

ตารางที่ 13 มาตรฐานแรงดันแต่ละฮาร์โมนิกประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี

Individual Harmonics		
h-th harmonic	Voltage Distortion (%)	Condition
$h < 15$	5	Normal
$h < 19$	9	Short term
$h = 100$	1	Linear decrease

ที่มา: Katic (1994)

ตารางที่ 14 มาตรฐานแรงดันฮาร์โมนิกประเทศสวีเดน

Voltage Level	Individual Harmonics Distortion (%)	THD _v (%)
$V = 0.4 \text{ kV}$	3.0	4.0
$3.3 < V < 24 \text{ kV}$	2.5	3.0
$36 < V < 72 \text{ kV}$	1.5	2.0
$V > 84 \text{ kV}$	0.7	1.0

ที่มา: Katic (1994)

3. ข้อมูลแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกของประเทศอังกฤษ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี และสวีเดน

ตารางที่ 15 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกประเทศอังกฤษ

ประเทศ	ชนิดของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก	ระดับแรงดันที่ต่อที่จุด PCC (kV)	ขนาด (MW)	ติดตั้ง Filter
England	Converter	0.415	0.0075	Yes
England	Converter	3	5.75	Yes
England	AC/DC Converter	11	15	Yes
England	Electric Arc Furnace	12.47	15	Yes
England	Rectifier	13.8	36	Yes
England	Electric Arc Furnace	35	20	Yes
England	Converter	128	30	Yes
England	Adjustable Speed Drive	132	8	Yes

ที่มา: Baker *et al* (1991); Taylor *et al* (1998)

ตารางที่ 16 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกประเทศฝรั่งเศส

ประเทศ	ชนิดของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก	ระดับแรงดันที่ต่อที่จุด PCC (kV)	ขนาด (MW)	ติดตั้ง Filter
France	AC/DC Converter 24 pulses	33	100	Yes
France	Converter	63	4	Yes
France	Electric Arc Furnace	63	160	Yes
France	Converter	90	4	Yes
France	Electric Arc Furnace	225	123	Yes

ที่มา: Pouliquen *et al* (1993); Ladoux *et al* (2005)

ตารางที่ 17 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกประเทศสหรัฐอเมริกา

ประเทศ	ชนิดของแหล่ง กำเนิดฮาร์มอนิก	ระดับแรงดันที่ ต่อที่จุด PCC (kV)	ขนาด (MW)	ติดตั้ง Filter
USA	Variable Speed Drive	2.3	1.12	No
USA	Adjustable Speed Drive	4.16	0.4	No
USA	Adjustable Speed Drive	4.16	0.596	No
USA	Adjustable Speed Drive	4.16	1.12	No
USA	Converter 12 pulse	4.16	1.31	No
USA	Adjustable Speed Drive	4.16	1.31	No
USA	Adjustable Speed Drive	4.16	1.49	Yes
USA	Converter 6 pulse	4.16	1.68	Yes
USA	Variable Speed Drive	4.16	1.7	Yes
USA	PWM	4.16	1.865	Yes
USA	Adjustable Speed Drive	4.16	1.87	Yes
USA	Adjustable Speed Drive	4.16	2.34	yes
USA	Variable Speed Drive	4.16	2.6	yes
USA	Boost Converter	4.6	0.6	no
USA	Drive	6.6	0.764	yes
USA	Variable Speed Drive	12.47	1.1	yes
USA	Drive	12.47	10.59	yes
USA	Electric Arc Furnace	12.47	20	yes
USA	Adjustable Speed Drive	12.5	0.052	no
USA	Variable Speed Drive	12.5	0.149	no

ตารางที่ 17 (ต่อ)

ประเทศ	ชนิดของแหล่ง กำเนิดฮาร์มอนิก	ระดับแรงดันที่ ต่อที่จุด PCC (kV)	ขนาด (MW)	ติดตั้ง Filter
USA	Static Converter	13.2	15	no
USA	Adjustable Speed Drive	13.8	0.186	yes
USA	Variable Speed Drive	13.8	0.37	yes
USA	Adjustable Speed Drive	13.8	1.5	no
USA	Adjustable Speed Drive	13.8	5.37	yes
USA	Adjustable Speed Drive	23	0.298	no
USA	Converter	23	1.5	no
USA	Adjustable Speed Drive	24	1.49	yes
USA	Voltage Source Inverter	26	2.98	yes
USA	Cycloconverter Converter	27.6	6.53	yes
USA	Adjustable Speed Drive	30.6	0.23	yes
USA	Variable Speed Drive	44	0.93	yes
USA	Adjustable Speed Drive	44	0.9325	yes
USA	Variable Speed Drive	46	8.95	yes
USA	Variable Speed Drive	69	0.93	yes
USA	Converter	69	2.24	yes
USA	Variable Speed Drive	69	3.39	yes
USA	Variable Speed Drive	69	20	no
USA	Variable Speed Drive	115	4.5	yes
USA	Variable Speed Drive	115	6.5	yes
USA	Adjustable Speed Drive	115	11.2	yes
USA	Voltage Source Inverter	115	37.5	yes

ตารางที่ 17 (ต่อ)

ประเทศ	ชนิดของแหล่ง กำเนิดฮาร์โมนิก	ระดับแรงดันที่ ต่อที่จุด PCC (kV)	ขนาด (MW)	ติดตั้ง Filter
USA	Adjustable Speed Drive	115	100	yes
USA	Converter	120	200	yes
USA	Adjustable Speed Drive	138	19.396	yes
USA	Variable Speed Drive	138	30	yes
USA	Electric Arc Furnace	138	80	yes
USA	Inverter	138	80	yes
USA	Adjustable Speed Drive	144	4.48	yes
USA	Electric Arc Furnace	154	18	yes
USA	Electric Arc Furnace	161	77	yes
USA	Electric Arc Furnace	161	96	yes
USA	Static Converter	230	15	no
USA	Electric Arc Furnace	230	50	yes
USA	Electric Arc Furnace	230	100	yes
USA	Electric Arc Furnace	230	120	yes
USA	Converter	230	200	yes
USA	Converter	345	60	yes
USA	Electric Arc Furnace	500	110	yes

ที่มา: Hoevenaar *et al* (2003); Currence *et al* (1995); Medora and Kusko (1995); Pahwa and ward (1992); Renz *et al* (1998); Dick *et al* (2003); Schreiber (1991); Oliver and Banerjee (1988); Petro and Wood (2004); Carlson *et al* (1986); Ellis (1996)

ตารางที่ 18 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี

ประเทศ	ชนิดของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก	ระดับแรงดันที่ต่อที่จุด PCC (kV)	ขนาด (MW)	ติดตั้ง Filter
Germany	Converter	2.3	2.39	yes
Germany	Converter	20	17.7	yes
Germany	Converter	20	141.6	yes
Germany	Converter	30	2.8	yes
Germany	Converter	110	2.9	yes
Germany	Converter	110	35.6	yes
Germany	Converter	110	100	yes
Germany	Converter	220	25	yes
Germany	Arc Furnace	220	140	yes
Germany	Converter	380	300	yes
Germany	Converter	420	600	yes

ที่มา: Stade *et al* (2002); Bechtold (1998); Schlabbach (2005)

ตารางที่ 19 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกประเทศสวีเดน

ประเทศ	ชนิดของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก	ระดับแรงดันที่ต่อที่จุด PCC (kV)	ขนาด (MW)	ติดตั้ง Filter
Sweden	Frequency Converter	10.5	15	yes
Sweden	Nonlinear Load	20	0.8	yes
Sweden	Voltage Source Converter	132	31.5	yes

ที่มา: Grunbaum (2000)

4. อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง ตามมาตรฐาน IEC 76-5 ของแต่ละขนาดพิกัด kVA

ตารางที่ 20 อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง ตามมาตรฐาน IEC 76-5

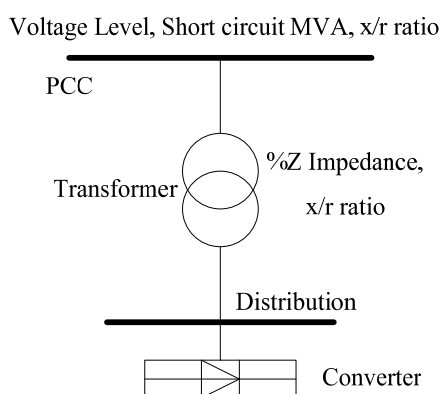
อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC 76-5	
Rated kVA	Impedance (%)
Up to 630	4.00
631-1250	5.00
1251-3150	6.25
3151-6300	7.15
6301-12500	8.35
12501-25000	10.00
25001-200000	12.50

ที่มา: John and Sarkar (1999)

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. วิธีการคำนวณ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการคำนวณหาค่า %THD_v ซึ่งเป็นค่าดัชนีชี้วัดของฮาร์มอนิก ที่มาตรฐานฮาร์มอนิกทุกประเทศใช้กันเป็นพื้นฐานในการวัดปริมาณฮาร์มอนิก โดยกำหนดรูปแบบจำลองการต่อวงจรภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แบบจำลองการต่อวงจรภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้น

และขั้นตอนวิธีการคำนวณเป็นลำดับดังนี้

1. คำนวณในระบบเปอร์ยูนิต (per unit) โดยกำหนดให้แรงดันต่อหน่วยและกำลังไฟฟ้าต่อหน่วย ที่จุด PCC

2. คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าจากค่าขนาดการลัดวงจร 3 เฟส ที่เก็บรวบรวมไว้ของประเทศอังกฤษ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันนี และสวีเดน ได้จากสูตร

$$Z_{system} = \frac{kV^2}{MVA_{SC}} \quad \text{p.u.}$$

3. คำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์และค่ารีซิสแตนซ์ ทั้งของระบบไฟฟ้าและของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้จากสูตร

$$Z = \sqrt{X^2 + R^2}$$

โดยนำอัตราส่วนระหว่างค่ารีแอกแตนซ์ต่อค่ารีซิสแตนซ์(x/r ratio) มาแทนค่าเพื่อหาค่าจริงของค่ารีแอกแตนซ์และค่ารีซิสแตนซ์ทั้งของระบบไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเป็นต่อหน่วย

4. คำนวณหาค่ากระแสภาระ โดยกำหนดขนาดกำลังงานของคอนเวอร์เตอร์ขึ้นมาเพื่อทดสอบว่าขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่เลือกขึ้นมานั้นผลิตกระแสฮาร์มอนิกออกมาเกินกว่าที่มาตรฐานแต่ละประเทศกำหนดหรือไม่ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$I_{load} = \frac{S}{\sqrt{3}V}$$

โดยที่ S คือกำลังงานไฟฟ้าปรากฏ หน่วย kVA

V คือแรงดันไฟฟ้า หน่วย โวลต์

5. แปลงค่ากระแสภาระให้เป็นค่าเปอร์ยูนิตได้จากสูตร

$$I_{load, pu.} = \frac{I_{load}}{I_{base}}$$

6. คำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกได้จากสูตร

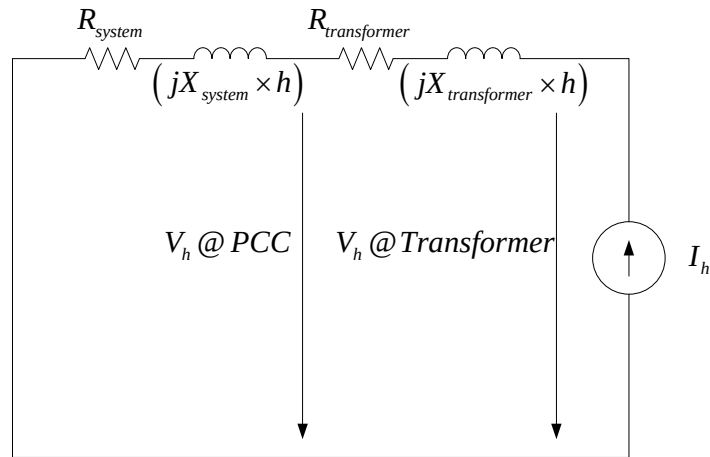
$$I_h = \frac{I_{load, pu.}}{h}$$

ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้คำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ ตามมาตรฐานของ IEC และ IEEE ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้คำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆของประเทศอังกฤษ สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันนี และสวีเดน นอกจากนั้นยังคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกได้จากสูตร

$$I_h = \frac{I_{load, pu.}}{\left(h - \frac{5}{h}\right)^{1.2}}$$

ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้คำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ ของประเทศฝรั่งเศส

7. จากภาพที่ 8 สามารถเขียนเป็นไดอะแกรมเส้นเดียวที่ความถี่ฮาร์โมนิกได้ดังนี้



ภาพที่ 9 ไดอะแกรมเส้นเดียวของแบบจำลองการต่อวงจรของภาระไม่เป็นเชิงเส้น

8. คำนวณหาค่าแรงดันฮาร์โมนิกที่จุด PCC ได้จากสูตร

$$V_h = I_h \times (R_{\text{system}} + (jX_{\text{system}} \times h))$$

9. คำนวณหาค่าความผิดเพี้ยนรวมรวมที่จุด PCC ได้จากสูตร

$$\%THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

ซึ่ง %THD_v ที่คำนวณได้จากขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่กำหนดขึ้นมามีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานแรงดันฮาร์โมนิกของแต่ละประเทศ แต่ถ้า %THD_v ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานฮาร์โมนิก ให้ทำการลดขนาดคอนเวอร์เตอร์ลงแล้วเริ่มคำนวณใหม่จนกว่า %THD_v ไม่เกินกำหนด ในทางกลับกันถ้า %THD_v ที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานฮาร์โมนิก ให้ทำการเพิ่มขนาดคอนเวอร์เตอร์ขึ้นแล้วเริ่มคำนวณใหม่จนกว่า %THD_v มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่มาตรฐานกำหนด

10. นำข้อมูลขนาดคอนเวอร์เตอร์สำรวจไว้ทั้งที่มีการติดตั้งและไม่มีติดตั้งวงจรกรองที่ระดับแรงดันเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบกับขนาดคอนเวอร์เตอร์ขนาดใหญ่ที่สุดที่มีค่า %THDv ไม่เกินที่มาตรฐานกำหนดที่ได้จากการคำนวณค่าขนาดการลัดวงจร 3 เฟส โดยนำมาพิจารณาว่าขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ได้จากการคำนวณสอดคล้องกับขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ได้จากการสำรวจหรือไม่ ซึ่งถ้าสอดคล้องกันก็หมายความว่าขนาดการลัดวงจรและค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า ส่งผลต่อขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่มาต่อเข้ากับระบบว่าไม่จำเป็นต้องติดตั้งวงจรกรองเสมอไป แต่ถ้าการสำรวจขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่มีการติดตั้งวงจรกรองไม่สอดคล้องกับขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่คำนวณได้จากค่าขนาดการลัดวงจร 3 เฟส แสดงให้เห็นว่าเป็นการติดตั้งวงจรกรองเพื่อป้องกันไม่ให้ภาระในอนาคตที่อาจผลิตฮาร์โมนิกออกมาเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด

2. ผลจากการคำนวณ

จากลำดับขั้นตอนที่ได้เสนอไปข้างต้น และนำมาเขียนโปรแกรมเพื่อทดสอบข้อมูลจาก (ตารางที่ 1) ถึง (ตารางที่ 5) ได้ผลขนาดของคอนเวอร์เตอร์สูงสุดที่ทำให้ %THDv ไม่เกินตามมาตรฐานที่แต่ละประเทศกำหนดและแสดงใน (ตารางที่ 21) ถึง (ตารางที่ 25)

ตารางที่ 21 ขนาดคอนเวอร์เตอร์ใหญ่ที่สุดที่ %THDv ไม่เกินมาตรฐานกำหนด ประเทศอังกฤษ

ขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ที่สุดที่ %THDv ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด						
Country	Location	Utility	System		Converter	THDv @ PCC
			Voltage (kV)	MVA _{sc}	Power (MVA)	(%)
England	Achill Island	Utility	10.8	6.9	0.1	5
England	Scotland	Irvine	11	762.1	12	5
England	ไอร์แลนด์	Electric Utility	11	250	3.9	5
England	ไอร์แลนด์	Utility	11	200	3.1	5
England	Achill Island	Utility	21	26.4	0.4	5
England	ไอร์แลนด์	Electricity	33	600	9.4	5
England	ไอร์แลนด์	Artfield Fell wind farm	33	389	6.1	5
England	Wales	Manweb distribution	33	78	1.2	5

ตารางที่ 21 (ต่อ)

ขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ที่สุดที่ %THD _v ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด						
Country	Location	Utility	System		Converter	THD _v @ PCC
			Voltage (kV)	MVA _{sc}	Power (MVA)	(%)
England	ไอร์แลนด์	Electricity Supply Comp.	33	20	0.3	5
England	ไอร์แลนด์	Hadyard Hill wind farm	132	1582	7.5	1.5
England	ไอร์แลนด์	Folkestone	132	800	3.7	1.5
England	ไอร์แลนด์	Asfordby	132	565	2.6	1.5

ตารางที่ 22 ขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ที่สุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด ประเทศฝรั่งเศส

ขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ที่สุดที่ %THD _v ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด						
Country	Location	Utility	System		Converter	THD _v @ PCC
			Voltage (kV)	MVA _{sc}	Power (MVA)	(%)
France	ไอร์แลนด์	Utility	63	400	3.1	1.6
France	ไอร์แลนด์	Utility	90	400	3.1	1.6
France	ไอร์แลนด์	Utility	225	1500	11.9	1.6
France	Les Mandarins	ไอร์แลนด์	400	11700	93.1	1.6

ตารางที่ 23 ขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ที่สุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด ประเทศสหรัฐอเมริกา

ขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ที่สุดที่ %THD _v ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด						
Country	Location	Utility	System		Converter	THD _v @ PCC
			Voltage (kV)	MVA _{sc}	Power (MVA)	(%)
USA	ไอร์แลนด์	Utility	4.16	123.57	1.9	5
USA	ไอร์แลนด์	Utility	4.16	121.518	1.9	5
USA	ไอร์แลนด์	Utility	4.16	116.459	1.8	5

ตารางที่ 23 (ต่อ)

ขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ที่สุดที่ %THD _v ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด						
Country	Location	Utility	System		Convereter	THD _v @ PCC
			Voltage (kV)	MVA _{sc}	Power (MVA)	(%)
USA	ไม่วะบุ	Utility	4.16	115.96	1.8	5
USA	ไม่วะบุ	Utility	4.16	113.91	1.8	5
USA	ไม่วะบุ	Utility	4.16	109.33	1.7	5
USA	ไม่วะบุ	Utility	4.16	107.76	1.7	5
USA	ไม่วะบุ	Utility	4.16	104.72	1.6	5
USA	ไม่วะบุ	Utility	4.16	103.195	1.6	5
USA	ไม่วะบุ	Utility	4.16	99.59	1.5	5
USA	ไม่วะบุ	Utility	4.16	98.26	1.5	5
USA	ไม่วะบุ	Utility	4.16	95.33	1.5	5
USA	ไม่วะบุ	Utility	4.16	94.109	1.4	5
USA	ไม่วะบุ	Utility	4.16	94.03	1.4	5
USA	ไม่วะบุ	Utility	4.16	92.83	1.4	5
USA	Nebraska	ไม่วะบุ	12.47	224.367	3.5	5
USA	ไม่วะบุ	ไม่วะบุ	12.47	126.9	2	5
USA	Colorado	ไม่วะบุ	12.47	113.63	1.7	5
USA	Nebraska	ไม่วะบุ	12.47	66.09	1	5
USA	ไม่วะบุ	Amerada Hess Corp.	12.5	19.49	0.3	5
USA	ไม่วะบุ	Cascade Creek Sub.	13.8	2460	38	5
USA	ไม่วะบุ	Zumbro River Sub.	13.8	2460	38	5
USA	Massachusetts	ไม่วะบุ	13.8	1001	15	5
USA	Ohio	ไม่วะบุ	13.8	500	7.9	5
USA	New Orleans	ไม่วะบุ	13.8	358.53	5.6	5
USA	Texas	ไม่วะบุ	13.8	301.41	4.7	5
USA	Minnesota	Hibbing	23	556	8	5

ตารางที่ 23 (ต่อ)

ขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ที่สุดที่ %THD _v ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด						
Country	Location	Utility	System		Convereter	THD _v @ PCC
			Voltage (kV)	MVA _{sc}	Power (MVA)	(%)
USA	Kansas	W. Stadium	34.5	159.01	2.5	5
USA	Kansas	NEKSU	34.5	144.37	2.2	5
USA	Kansas	Matter Corner	34.5	120.65	1.9	5
USA	Kansas	Stagg Hill	34.5	119.69	1.8	5
USA	Utah	ไม่ระบุ	46	1000	15.8	5
USA	New York	ไม่ระบุ	69	600	9	5
USA	New York	ไม่ระบุ	115	5577	44	2.5
USA	ไม่ระบุ	Harborton	115	5000	39	2.5
USA	ไม่ระบุ	Rhode Island	115	4400	34	2.5
USA	Oregon	McNary	115	4400	34	2.5
USA	Oregon	Big Eddy	115	4100	32	2.5
USA	ไม่ระบุ	Graham Rd. Sub.	115	2437	19	2.5
USA	ไม่ระบุ	Ice Habour	115	2300	18	2.5
USA	Washington	Grand Coulee	115	2200	17	2.5
USA	ไม่ระบุ	Bonn	115	2100	16	2.5
USA	Highgate	Highgate(West)	115	480	3	2.5
USA	New York	Chateauguay	120	7600	60	2.5
USA	ไม่ระบุ	Hydro-Quebec	120	520	4	2.5
USA	Highgate	Highgate(East)	120	420	3	2.5
USA	California	Willow Glen sub.	138	15536	122	2.5
USA	Virginia	Matt Funk Sub.	138	4977.6	39	2.5
USA	ไม่ระบุ	Port Alberni	138	1900	15	2.5
USA	Kentucky	Inez Substation	138	1300	10	2.5
USA	Wisconsin	ไม่ระบุ	161	2407	19	2.5

ตารางที่ 23 (ต่อ)

ขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ที่สุดที่ %THD _v ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด						
Country	Location	Utility	System		Convereter	THD _v @ PCC
			Voltage (kV)	MVA _{sc}	Power (MVA)	(%)
USA	Wisconsin	ไม่วะบุ	161	1913	15	2.5
USA	New Orleans	Gypsy	230	21576	102	1.5
USA	Washington	Grand Coulee	230	20750	98	1.5
USA	New Orleans	Gypsy	230	18015	85	1.5
USA	Oregon	Big Eddy	230	15700	74	1.5
USA	New Orleans	Gypsy	230	15664	74	1.5
USA	ไม่วะบุ	Wanapun	230	14800	70	1.5
USA	Washington	Chief Joseph	230	14400	68	1.5
USA	California	RIVER ROCK SUB.	230	13750	65	1.5
USA	New Orleans	Gypsy	230	13568	64	1.5
USA	New Orleans	Gypsy	230	12203	57	1.5
USA	New Orleans	Gypsy	230	10196	48	1.5
USA	Oregon	Trojan	230	10000	47	1.5
USA	Oregon	McNary	230	9300	44	1.5
USA	California	Willow Glen sub.	230	7967	37	1.5
USA	Berkeley	Nucor Stell	230	5000	23	1.5
USA	Ontario	Hydro power	230	3750	17	1.5
USA	New Maxico	New Maxico (East)	230	2020	9	1.5
USA	ไม่วะบุ	Eddy County Sub.	230	2000	9	1.5
USA	Sidney	Sidney (East)	230	1720	8	1.5
USA	New England	Comerford Station	230	1587	7	1.5
USA	Sidney	Sidney (West)	230	1040	4	1.5
USA	Miles City	Miles City (East)	230	550	2	1.5
USA	Miles City	Miles City (West)	230	400	1	1.5

ตารางที่ 23 (ต่อ)

ขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ที่สุดที่ %THD _v ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด						
Country	Location	Utility	System		Convereter	THD _v @ PCC
			Voltage (kV)	MVA _{sc}	Power (MVA)	(%)
USA	New York	Marcy Substation	345	17000	80	1.5
USA	New Maxico	New Maxico (West)	345	740	3	1.5
USA	Washington	Grand Coulee	500	28000	132	1.5
USA	ไ่ม่ระบุ	NPR	500	25200	119	1.5
USA	Oregon	John Day	500	23000	109	1.5
USA	Washington	Chief Joseph	500	20750	98	1.5
USA	Washington	Lo.Mo.	500	19000	90	1.5
USA	Oregon	Slatt substation	500	17580	83	1.5
USA	Washington	Little Goose	500	17200	81	1.5
USA	California	Willow Glen sub.	500	12990	61	1.5

ตารางที่ 24 ขนาดคอนเวอร์เตอร์ใหญ่ที่สุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด
ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน

ขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ที่สุดที่ %THD _v ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด						
Country	Location	Utility	System		Convereter	THD _v @ PCC
			Voltage (kV)	MVA _{sc}	Power (MVA)	(%)
Germany	ไ่ม่ระบุ	German Utility	11	184	5.8	10
Germany	ไ่ม่ระบุ	MEAG	20	350	11	10
Germany	West Berlin	Bewag	30	3614	114.4	10
Germany	ไ่ม่ระบุ	German Utility	110	7506.7	237.6	10
Germany	ไ่ม่ระบุ	Rosend	110	6001.6	190	10
Germany	ไ่ม่ระบุ	Karnap	110	6001.6	190	10
Germany	ไ่ม่ระบุ	MEAG	110	5000	158.3	10

ตารางที่ 24 (ต่อ)

ขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ที่สุดที่ %THD _v ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด						
Country	Location	Utility	System		Convereter	THD _v @ PCC
			Voltage (kV)	MVA _{sc}	Power (MVA)	(%)
Germany	West Berlin	Bewag	110	3614	114.4	10
Germany	ไม่ว่าจะ	German Utility	220	22443.9	710.6	10
Germany	ไม่ว่าจะ	German Utility	380	45216.9	1431.6	10
Germany	ไม่ว่าจะ	Etzenricht Sub.	420	6000	189.9	10

ตารางที่ 25 ขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ที่สุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด ประเทศสวีเดน

ขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ที่สุดที่ %THD _v ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด						
Country	Location	Utility	System		Convereter	THD _v @ PCC
			Voltage (kV)	MVA _{sc}	Power (MVA)	(%)
Sweden	Alsvik	ไม่ว่าจะ	10	11	0.1	3
Sweden	Bockstigen	ไม่ว่าจะ	10.5	31.55	0.4	3
Sweden	Hjartholmen	ไม่ว่าจะ	10.5	55	0.8	3
Sweden	Utility	ไม่ว่าจะ	12	457	6.8	3
Sweden	Soderasen	ไม่ว่าจะ	130	1576.2	7.8	1
Sweden	Morarp	ไม่ว่าจะ	130	4007.9	19.9	1
Sweden	Hagfors	Uddeholm Tooling	132	1000	4.9	1
Sweden	Utility	ไม่ว่าจะ	132	4000	19.9	1
Sweden	Stockholm	ไม่ว่าจะ	220	11000	54.7	1
Sweden	Lindome	ไม่ว่าจะ	400	1000	4.9	1
Sweden	Utility	ไม่ว่าจะ	400	7500	37.3	1

ผลและวิจารณ์

ผล

1. ผลสรุปของประเทศอังกฤษ

1.1 ผลสรุปประเทศอังกฤษที่ระดับแรงดัน 11 kV

จาก (ตารางที่ 21) ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณหาขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด พบว่าที่ระดับแรงดัน 11 kV ซึ่งมีค่าขนาดการลัดวงจร 3 เฟสต่างกัน มีคอนเวอร์เตอร์ขนาดสูงสุดที่ทำให้มีค่า %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนดมีค่าต่างกันด้วย โดยที่ขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดคือ 12 MW ที่ 762.1 MVA_{sc} เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสำรวจแสดงดัง (ตารางที่ 15) พบว่าขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งบนระดับแรงดัน 11 kV มีค่า 15 MW ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดสูงสุดที่คำนวณได้ จึงมีการติดตั้งวงจรกรอง

2. ผลสรุปของประเทศฝรั่งเศส

2.1 ผลสรุปประเทศฝรั่งเศสที่ระดับแรงดัน 63 kV

จาก (ตารางที่ 22) ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณหาขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด พบว่าที่ระดับแรงดัน 63 kV ซึ่งมีค่าขนาดการลัดวงจร 3 เฟสต่างกัน มีคอนเวอร์เตอร์ขนาดสูงสุดที่ทำให้มีค่า %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนดมีค่าต่างกันด้วย โดยที่ขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดคือ 3.1 MW ที่ 400 MVA_{sc} เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสำรวจแสดงดัง (ตารางที่ 16) พบว่าขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งบนระดับแรงดัน 63 kV มีค่า 4 MW ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดสูงสุดที่คำนวณได้ จึงมีการติดตั้งวงจรกรอง

2.2 ผลสรุปประเทศฝรั่งเศสที่ระดับแรงดัน 90 kV

จาก (ตารางที่ 22) ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณหาขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด พบว่าที่ระดับแรงดัน 90 kV ซึ่งมีค่าขนาดการลัดวงจร 3 เฟสต่างกัน มีคอนเวอร์เตอร์ขนาดสูงสุดที่ทำให้มีค่า %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนดมีค่าต่างกันด้วย โดยที่ขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดคือ 3.1 MW ที่ 400 MVA_{sc} เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการ

สำรวจแสดงดัง (ตารางที่ 16) พบว่าขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งบนระดับแรงดัน 90 kV มีค่า 4 MW ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดสูงสุดที่คำนวณได้ จึงมีการติดตั้งวงจรกรอง

2.3 ผลสรุปประเทศฝรั่งเศสที่ระดับแรงดัน 225 kV

จาก (ตารางที่ 22) ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณหาขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด พบว่าที่ระดับแรงดัน 225 kV ซึ่งมีค่าขนาดการลัดวงจร 3 เฟสต่างกัน มีคอนเวอร์เตอร์ขนาดสูงสุดที่ทำให้มีค่า %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนดมีค่าต่างกันด้วย โดยที่ขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดคือ 11.9 MW ที่ 1500 MVA_{sc} เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสำรวจแสดงดัง (ตารางที่ 16) พบว่าขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งบนระดับแรงดัน 225 kV มีค่า 123 MW ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดสูงสุดที่คำนวณได้ จึงมีการติดตั้งวงจรกรอง

3. ผลสรุปของประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1 ผลสรุปของประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ระดับแรงดัน 4.16 kV

จาก (ตารางที่ 23) ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณหาขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด พบว่าที่ระดับแรงดัน 4.16 kV ซึ่งมีค่าขนาดการลัดวงจร 3 เฟสต่างกัน มีคอนเวอร์เตอร์ขนาดสูงสุดที่ทำให้มีค่า %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนดมีค่าต่างกันด้วย โดยที่ขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดคือ 1.4 MW ที่ 94.109 MVA_{sc} เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสำรวจแสดงดัง (ตารางที่ 17) พบว่าขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งบนระดับแรงดัน 4.16 kV มีค่า 1.49 MW ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดสูงสุดที่คำนวณได้ จึงมีการติดตั้งวงจรกรอง

3.2 ผลสรุปของประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ระดับแรงดัน 12.47 kV

จาก (ตารางที่ 23) ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณหาขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด พบว่าที่ระดับแรงดัน 12.47 kV ซึ่งมีค่าขนาดการลัดวงจร 3 เฟสต่างกัน มีคอนเวอร์เตอร์ขนาดสูงสุดที่ทำให้มีค่า %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนดมีค่าต่างกันด้วย โดยที่ขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดคือ 0.3 MW ที่ 19.49 MVA_{sc} เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสำรวจแสดงดัง (ตารางที่ 17) พบว่าขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งบนระดับแรงดัน 12.47 kV มีค่า 1.1 MW ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดสูงสุดที่คำนวณได้ จึงมีการติดตั้งวงจรกรอง

3.3 ผลสรุปของประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ระดับแรงดัน 115 kV

จาก (ตารางที่ 23) ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณหาขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด พบว่าที่ระดับแรงดัน 115 kV ซึ่งมีค่าขนาดการลัดวงจร 3 เฟสต่างกัน มีคอนเวอร์เตอร์ขนาดสูงสุดที่ทำให้มีค่า %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนดมีค่าต่างกันด้วย โดยที่ขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดคือ 3 MW ที่ 480 MVA_{sc} เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสำรวจแสดงดัง (ตารางที่ 17) พบว่าขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งบนระดับแรงดัน 115 kV มีค่า 4.5 MW ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดสูงสุดที่คำนวณได้ จึงมีการติดตั้งวงจรกรอง

3.4 ผลสรุปของประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ระดับแรงดัน 138 kV

จาก (ตารางที่ 23) ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณหาขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด พบว่าที่ระดับแรงดัน 138 kV ซึ่งมีค่าขนาดการลัดวงจร 3 เฟสต่างกัน มีคอนเวอร์เตอร์ขนาดสูงสุดที่ทำให้มีค่า %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนดมีค่าต่างกันด้วย โดยที่ขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดคือ 10 MW ที่ 1300 MVA_{sc} เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสำรวจแสดงดัง (ตารางที่ 17) พบว่าขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งบนระดับแรงดัน 138 kV มีค่า 19 MW ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดสูงสุดที่คำนวณได้ จึงมีการติดตั้งวงจรกรอง

3.5 ผลสรุปของประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ระดับแรงดัน 230 kV

จาก (ตารางที่ 23) ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณหาขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด พบว่าที่ระดับแรงดัน 230 kV ซึ่งมีค่าขนาดการลัดวงจร 3 เฟสต่างกัน มีคอนเวอร์เตอร์ขนาดสูงสุดที่ทำให้มีค่า %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนดมีค่าต่างกันด้วย โดยที่ขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดคือ 17 MW ที่ 3750 MVA_{sc} เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสำรวจแสดงดัง (ตารางที่ 17) พบว่าขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งบนระดับแรงดัน 230 kV มีค่า 50 MW ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดสูงสุดที่คำนวณได้ จึงมีการติดตั้งวงจรกรอง

4. ผลสรุปของประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี

4.1 ผลสรุปของประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี ที่ระดับแรงดัน 20 kV

จาก (ตารางที่ 24) ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณหาขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด พบว่าที่ระดับแรงดัน 20 kV ซึ่งมีค่าขนาดการลัดวงจร 3 เฟสต่างกัน มีคอนเวอร์เตอร์ขนาดสูงสุดที่ทำให้มีค่า %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนดมีค่าต่างกันด้วย โดยที่ขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดคือ 11 MW ที่ 350 MVA_{sc} เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสำรวจแสดงดัง (ตารางที่ 18) พบว่าขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งบนระดับแรงดัน 20 kV มีค่า 17.7 MW ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดสูงสุดที่คำนวณได้ จึงมีการติดตั้งวงจรกรอง

5. ผลสรุปของประเทศสวีเดน

5.1 ผลสรุปของประเทศสวีเดน ที่ระดับแรงดัน 10.5 kV

จาก (ตารางที่ 25) ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณหาขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด พบว่าที่ระดับแรงดัน 10.5 kV ซึ่งมีค่าขนาดการลัดวงจร 3 เฟสต่างกัน มีคอนเวอร์เตอร์ขนาดสูงสุดที่ทำให้มีค่า %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนดมีค่าต่างกันด้วย โดยที่ขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดคือ 0.8 MW ที่ 55 MVA_{sc} เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสำรวจแสดงดัง (ตารางที่ 19) พบว่าขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งบนระดับแรงดัน 10.5 kV มีค่า 15 MW ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดสูงสุดที่คำนวณได้ จึงมีการติดตั้งวงจรกรอง

5.2 ผลสรุปของประเทศสวีเดน ที่ระดับแรงดัน 132 kV

จาก (ตารางที่ 25) ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณหาขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดที่ %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนด พบว่าที่ระดับแรงดัน 132 kV ซึ่งมีค่าขนาดการลัดวงจร 3 เฟสต่างกัน มีคอนเวอร์เตอร์ขนาดสูงสุดที่ทำให้มีค่า %THD_v ไม่เกินมาตรฐานกำหนดมีค่าต่างกันด้วย โดยที่ขนาดคอนเวอร์เตอร์สูงสุดคือ 19.9 MW ที่ 4007.9 MVA_{sc} เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสำรวจแสดงดัง (ตารางที่ 19) พบว่าขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งบนระดับแรงดัน 132 kV มีค่า 31.5 MW ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดสูงสุดที่คำนวณได้ จึงมีการติดตั้งวงจรกรอง

วิจารณ์

การคำนวณหาขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใหญ่ที่สุดที่ใช้ในระบบได้โดยไม่ต้องติดตั้งวงจรกรองนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าอิมพีแดนซ์ต่อค่ารีซิสแตนซ์ของระบบและของหม้อแปลงซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ต่อค่ารีซิสแตนซ์ของระบบนั้น พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ต่อค่ารีซิสแตนซ์ของระบบมีค่าน้อยที่สุดที่ยอมรับได้เท่ากับ 2.5 และค่าอิมพีแดนซ์ต่อค่ารีซิสแตนซ์ของหม้อแปลงจำหน่ายที่ยอมรับได้เท่ากับ 10 ซึ่งจากการคำนวณได้ทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ต่อค่ารีซิสแตนซ์ของระบบจาก 2.5 จนถึง 20 และปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ต่อค่ารีซิสแตนซ์ของหม้อแปลงจาก 2.5 จนถึง 10 ผลที่ได้คือขนาดของคอนเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลงไปน้อยมากหรือแทบไม่เปลี่ยนแปลงเลย

การคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกของคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ ตามมาตรฐาน IEC, IEEE และตามมาตรฐานของประเทศฝรั่งเศส พบว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ ที่คำนวณได้ดัง (ตารางที่ 26)

ตารางที่ 26 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกแบบ 6 พัลส์ ตามมาตรฐาน IEC,IEEE กับมาตรฐาน EDF

ลำดับ	IEC, IEEE	EDF	ผลต่างระหว่าง	ผลการเปรียบเทียบ
ฮาร์มอนิก	I_h (A)	I_h (A)	IEC, IEEE กับ EDF (A)	(%)
1	100.0000	100.0000	0.0000	0.0000
5	20.0000	18.9465	1.0535	5.2677
7	14.2857	11.0147	3.2710	22.8968
11	9.0909	5.9200	3.1709	34.8800
13	7.6923	4.7744	2.9179	37.9327
17	5.8824	3.4084	2.4739	42.0564
19	5.2632	2.9701	2.2931	43.5690
23	4.3478	2.3490	1.9989	45.9739
25	4.0000	2.1216	1.8784	46.9607
29	3.4483	1.7710	1.6772	48.6396
31	3.2258	1.6334	1.5924	49.3655

ผลการเปรียบเทียบพบว่ากระแสฮาร์โมนิกของคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ ที่คำนวณได้ตามมาตรฐาน IEC, IEEE มีค่ามากกว่าที่คำนวณได้ตามมาตรฐาน EDF ซึ่งการคำนวณตามมาตรฐาน EDF นั้นใช้คำนวณเฉพาะประเทศฝรั่งเศส ส่วนการคำนวณตามมาตรฐาน IEC, IEEE นั้นใช้คำนวณประเทศอังกฤษ สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันนี และสวีเดน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษามาตรฐานฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศอังกฤษ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี และสวีเดน พบว่าการกำหนดมาตรฐานฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังของแต่ละประเทศแตกต่างกันทั้งตัวดัชนีชี้วัดปริมาณฮาร์มอนิก และค่าของดัชนีชี้วัดปริมาณฮาร์มอนิก โดยทุกประเทศให้ความสำคัญกับค่า %THD_v มากที่สุด และมีประเทศสหรัฐอเมริกาที่สนใจค่า %THD_i ด้วย ส่วนค่าของ %THD_v นั้น ทุกประเทศกำหนดค่าไว้แตกต่างกัน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสนใจที่ค่า %THD_v ในการกำหนดมาตรฐานฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากการศึกษามาตรฐานฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศอังกฤษ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี และสวีเดน พบว่าการกำหนดค่า %THD_v ทุกประเทศก็กำหนดไว้ไม่เท่ากันในทุกๆ ระดับแรงดัน เนื่องจากแต่ละประเทศมีการจัดระบบไฟฟ้าที่ไม่เหมือนกันเช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นประเทศที่มีขนาดใหญ่มีพื้นที่กว้างมีการจัดวางระบบไฟฟ้าเป็นแบบวงจรเรเดียล (Radial) ซึ่งเป็นการจัดวางระบบไฟฟ้าที่ง่ายไม่ซับซ้อนต่อการจัดระบบป้องกันและการลงทุนไม่สูงมากแต่ระบบก็จะมีความน่าเชื่อถือต่ำ เมื่อเทียบกับประเทศฝรั่งเศสซึ่งเป็นประเทศที่เล็กกว่าประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีการจัดระบบไฟฟ้าเป็นแบบเครือข่าย (Network) ซึ่งเป็นการจัดระบบไฟฟ้าที่ซับซ้อนยากต่อการจัดระบบป้องกัน และการจัดระบบแบบเครือข่ายนี้ต้องลงทุนสูงมาก แต่ระบบก็จะมีความน่าเชื่อถือสูงกว่าการจัดระบบแบบเรเดียลเช่นกัน

เมื่อศึกษาถึงการจัดวางระบบไฟฟ้ามีผลต่อการกำหนดมาตรฐานฮาร์มอนิกได้ทำการศึกษาต่อไปจนพบว่า การจัดวางระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกันนั้นมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบแตกต่างกันด้วย ซึ่งการหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบนั้นสามารถหาได้จากขนาดการลัดวงจร 3 เฟส โดยที่ขนาดการลัดวงจร 3 เฟส นั้นเป็นเพียงพารามิเตอร์เดียวที่มีผลต่อการกำหนดมาตรฐานฮาร์มอนิกจากการศึกษาพบว่าการกำหนดมาตรฐานฮาร์มอนิกนั้นต้องทราบพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

1. ขนาดการลัดวงจร 3 เฟส (Short Circuit Capacity)
2. ระดับแรงดันปรกติที่เกิดการลัดวงจร 3 เฟส
3. ค่าอินดักแตนซ์ต่อค่ารีซิสแตนซ์ของระบบไฟฟ้า (x/r ratio system)
4. ค่าอินดักแตนซ์ต่อค่ารีซิสแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า (x/r ratio transformer)
5. ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง
6. ขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้า

ซึ่งนอกจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆเหล่านี้แล้ว ยังต้องคำนึงถึงผู้ใช้ไฟฟ้าอีกด้วยว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดออกมานั้นผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถรับได้หรือไม่ ดังนั้นเมื่อจะมีการกำหนดมาตรฐานฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลังขึ้น ควรมีการหารือกับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่อีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

การเก็บรวบรวมข้อมูลที่เป็นต่อการกำหนดมาตรฐานฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศอังกฤษ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันนี และสวีเดน ทำได้ยากลำบาก เพราะข้อมูลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นขนาดการลัดวงจร 3 เฟส ค่าอินดักแตนซ์ต่อค่ารีซิสแตนซ์ของระบบไฟฟ้า และขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่มีใช้ในระบบไฟฟ้าไม่สามารถหาได้จากเอกสารทั่วไปหรือจากอินเทอร์เน็ต เพราะข้อมูลเหล่านี้ส่วนใหญ่จะไม่มีเปิดเผยต่อสาธารณะชน ดังนั้นข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้นั้นจึงต้องหามาจากบทความวิจัยต่างๆ ที่บอกถึงค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไว้ ส่งผลให้ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จึงขาดความสมบูรณ์ไปบางส่วนทั้งในส่วน of ค่าอินดักแตนซ์ต่อค่ารีซิสแตนซ์ของระบบไฟฟ้าและขนาดคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบ ดังนั้นถ้าข้อมูลที่เป็นต้องให้มีครบถ้วนสมบูรณ์จะทำให้การกำหนดมาตรฐานฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลังถูกต้องยิ่งขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

วิบูลย์ ชื่นแขก. 2541. เอกสารประกอบการบรรยาย เรื่อง ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

_____. 2549. ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ABB Switzerland Ltd. Advanced Power Electronics. 2007a. **DB Energie GmbH, Railway Converter Station, Dusseldorf, Germany.** www.abb.com/powerelectronics,

_____. 2007b. **DB Energie GmbH, Railway Converter Station, Limburg, Germany.** www.abb.com/powerelectronics,

_____. 2007c. **DB Energie GmbH, Railway Converter Station, Wolkramshausen, Germany.** www.abb.com/powerelectronics.

Adamiak, M.G. and J.P. Jauch. 1986. Field Experience with the AEP digital relay. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Vol. PWRD-1, No. 4.

Albaugh, J. R. and M. J. Kornblit. 1993. Updating A Steel Mill Power System to Improve Reliability and Decrease Energy Costs. **IEEE**.

Baker, M. H., D.J. Young and N. M. MacLeod. 1991a. A Range of Directly Connected TCR's to Reduce Voltage Disturbances. **IEEE**.

_____, _____, _____. 1991b. Small SVC's for Industrial Applications. **IEEE**.

_____, _____ and M W.H. Minchin. 1991c. Small SVC's for industrial applications. **IEEE**.

- Barcus, James M. and Satoru Ihara. 1988. Harmonic Assessment of Cement Plants. **IEEE**
- Barnes, R. and K.T. Wong. 1991. Unbalance and harmonic studies for the Channel Tunnel railway syste. **IEE Proceedings-B**, Vol. 138, No. 2.
- Bechtold, Klaus. 1998. Berlin Bounds from Insular to Integrated Operations. **IEEE Computer Applications in Power**.
- Beech, M. .J. 2005. **The integration of renewable energy into the electrical distribution network on achill island, Ireland**. Loughborough University, Loughborough, Leics LE11 3TU.
- Bernadelli, R. L., R. A. Schmidt and S. Ihara. 1986. Harmonic Resonances - Occurrence and Prevention. **Second International Conference on Harmonics in Power Systems**. October 6,7,8.
- Bhatia, Ram., Alessandro Bonanini and John T. Inge. 1999. Adjustable Speed Drive Using a Single 135,000 HP Sysynchronous Motor. **IEEE Transactions on Energy Convertsion**, Vol. 14, No. 3.
- Bocquel, Aurelie and Jorg Janning. 2007. **Analysis of a 300 MW Variable Speed Drive for Pump Storage Plant Applications**. www.alstom.com, July 2, 2007
- Bollen, Math. 2003. **Voltage control and short circuits in power systems**. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. August 14.
- Carlson, D.L., L.P. Crane, C.M. Fedora, A.C. Tredeau and M.B. Marz. 1986. Assessment of harmonic and non harmonic distribution voltage distortion associated with a six pulse plasma torch rectifier. **Second International Conference on Harmonics in Power Systems**, October 6,7,8.

Chen, Jen-Hung. 2000. **Industrial** Power System Analysis with Database Access. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 36, No. 5.

Coles, P.C., M. Fracchia, R.J. Hill, P. Pozzobon and G. Sciutto. 1993. Modeling and Simulation of Supply Current Interference in Traction Systems Arising From Multi level Converters in High Power Locomotive Drives. **IEEE**.

Currence, Evan J., John E. Plizga and Howard N. Nelson. 1995. Harmonic Resonance at a Medium Sized Industrial Plant. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 31, No. 4.

Das, J.C. 1997a. Effects of Medium Voltage Capacitor Bank Switching Surges in an Industrial Distribution System. **IEEE**.

_____. 1997b. Limitations of Fault Current Limiters for Expansion of Electrical Distribution System. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 33, No. 4.

Davis, I.C. 2006. Supply System Voltage Fluctuations Caused by an AM Transmitter Load. **IEEE**.

Depommier, B. and J. Stanley. 2003. Static Var Compensator Upgrade in a Steel Mill. **IEEE**.

Dewan, Shashi B. and Jasons Rajda. 1998. Application of 46 kV, 100 MVA Smart Predictive line Controller (SPLC) to AC Electric Arc Furnace. **IEEE**.

Dick, Barry. 2003. Spot Don't Bump. **IEEE Industry Applications Magazine**.

Dionise, Thomas J., Visuth Lorch and Brando J. Brazil. 2007. Power Quality Investigation of Back to Back Harmonic Filters for A High Voltage Anode Foil Manufacturing Facility. **IEEE**.

- Duchon, Gunther. Walter Schultz, Christian Unger, Leon Voss, Bill Lockley and Jack Leuw. 2000. Experience with the Connection of Large Variable Speed Compressor Drives to HV Utility Distribution System. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 15, No.1.
- Einarsson, T., P. Wennerlund, L. Cederblad, S. Lindahl and S. Holst. 1994. Experiences of Current Differential Protections for Multi-Terminal Power Lines Using Multiplexed Data Transmission System. **CIGRE**, 34-203, 28 August - 3 September.
- Ellis, Robert G. 1996. Harmonic Analysis of Industrial Power System. **IEEE Transactions on Industrial Applications**, Vol. 32, No. 2,
- Engelman, Neil Emile Schreurs and Birger Drugge. 1991. Field Test Results for a Multi-Shot 12.47 kV Fault Current Limiter. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 6, No. 3.
- Fardanesh, B., B. Shperling, E. Uzunovic, S. Zelingher, L. Gyugyi, L. Kovalsky, S. Macdonald, C. Schauder and A. Edris. 2002. NYPA Convertible Static Compensator Validation of Controls and Steady-State Characteristics. **CIGRE**, 14-104.
- Finn, J.S. 1991. The power system for the Channel Tunnel. **Power Engineering Journal**.
- Fransen, Philip. 1997. Case History: Electronically Controlled Fault Current Limiters Allow Inplant Switchgear to be Interconnected. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 33, No. 2.
- Gampenrieder, R., K. Liegl, T. Wess, H. Ring, N. Christl, D. Troller and U. Weingarten. 1994. Design goals, specification studies and commissioning of the 600 MW HVDC Back to Back station Etzenricht. **CIGRE**. 14-105.
- Gerry, D., P. Wheeler and J. Clare. 2002. Power Flow Considerations in Multi Cellular, Multi Level Converters. **IEE**.

- Gole, A.M., Albert Keri, C. Nwankpa, E.W. Gunther, H.W. Dommel, I. Hassan, J.R. Marti, J.A. Martinez, K.G. Fehrle, L. Tang, M.F. McGranaghan, O.B. Nayak, P.F. Ribeiro, R. Iravani and R. Lasseter. 1997. Guidelines for Modeling Power Electronics in Electric Power Engineering Applications. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 12, No. 1.
- Grunbaum, R., Tomas Gustafsson and Ulf Olsson. 2000. SVC Light: Evaluation of first installation at Hagfors, Sweden. **CIGRE**. 13/14/36-03.
- Grunbaum, Rolf. 2006. **Voltage Source Converters for Maintaining of Power Quality and Stability in Power Distribution**. www.abb.com, June 20, 2006.
- Halpin, S.M. 2005. **Comparison of IEEE and IEC Harmonic Standard**. IEEE.
- Hartmann, David P. and Delmar G. Wohlgemuth. 1977. Power System short Circuit Planning for Superconducting Power Transmission. **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. MAG-13, No. 1.
- Haslam, S. J., P.A. Crossley and N. Jenkins. 1999. Design and evaluation of a wind farm protection relay. **IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.**, Vol. 146., No. 1.
- Hoevenaars, Tony., Kurt LeDoux and Matt Colosuno. 2003. Interpreting IEEE STD 519 and Meeting Its Harmonic Limits in VFD Applications. **IEEE**.
- Horwill, C. and G.S. 6 hEidhin. 2003. AZ to UK, a New Life for an SVC. **IEEE**.
- John, John K. and Subhas Sarkar. 1999. A Comparison of IEC 76 and ANSI C57.12 on Transformer. **IEEE**.

- Katic, Vladimir A. 1994. Network Harmonic Pollution A Review and Discussion of International and Standards and Recommendations. **IEEE**.
- Knight, R. C., D. J. Young and D.R. Trainer. 1998. Relocatable GTO-based Static Var Compensator for NGC Substations. **CIGRE**, 14-106.
- Krishnayya, P.C.S., R.J. Piwko, T.L. Weaver, M.P. Bahrman and A.E. Hammad. 1986. DC Transmission Terminating at Low Short Circuit Ratio Locations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. PWRD-1, No. 3.
- Krug, Dietmar, Mariusz Malinowski and Steffen Bernet. 2004. Design and Comparison of Medium Voltage Multi Level Converters for Industry Applications. **IEEE**.
- Ladoux, Philippe, Gianluca Postiglione, Henri Foch and Jacques Nuns. 2005. A Comparative Study of AC/DC Converters for High Power DC Arc Furnace. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 52, No. 3.
- Lundquist, J. and M. H. J. Bollen. 2000. Harmonic Active Power Flow in Low and Medium Voltage Distribution System. **IEEE**.
- Ma, T. L. and J. Mulcahy. 2006. The SPLC A New Technology for Arc Stabilization and Flicker Reduction on AC Electric Arc Furnaces. **IEEE**.
- Malmedal, Keith, P. K. Sen and John P. Nelson. 2004. Application of Out of Step Relaying for Small Generations in Distributed Generation. **IEEE**.
- Medora, Noshirwan K. and Alexander Kusko. 1995. Power Harmonic Problems at a Plastics Extrusion Plant. **IEEE**.

Mendis, S. R., M. T. Bishop and J. F. Witte. 1994. Investigations of Voltage Flicker in Electric Arc Furnace Power System. **IEEE**.

_____, _____, T. R. Day and D. M. Boyd. 1995. Evaluation of Supplementary Series Reactors to Optimize Electric Arc Furnace Operations. **IEEE**.

Meynaud, P. 1981. Perturbations de Tension Dans Les Reseaux de Distribution. **5-Les Courants et Tensions Harmoniques**, Electricite de France, Mise a jour le 1er juin.

Moghbelli, Hassan, Ken Groen, Ted Zaplatosch and Timothy Skvarenina. 1993. A Design Project to Evaluate the Protective Device Settings for an Industrial Plant. **IEEE**.

Moody, Doug, Vernon Beachum, Tom Natali, William Vilcheck and David D. Shipp. 2003. Application of a Hybrid Grounding Scheme to a Paper Mill 13.8 kV Generator. **IEEE**.

Natarajan, R., T. A. Kneschke, W. Naqvi, M. A. Lopez-Lopez, J. Hong and R. M. Bucci. 1997. Short Circuit Currents of the SEPTA Traction Power Distribution System. **IEEE Industry Applications Magazine**. May/June.

Neumann, C. 2006. Superconducting Fault Current Limiter (SFLC) in the Medium and High Voltage Grid. **IEEE**.

_____, G. Balzer, M. Hudasch, K. Liebscher, A. Strnad, K.H. Weck and T. Weinmann. 1998. Insulation coordination practice of German utilities-Procedures, experience and future trends. **CIGRE**, 33-102.

Oliver, J. A. and B. Ben Banerjee. 1988. Power Measurement and Harmonic Analysis of Large Adjustable Speed Drives. **IEEE Transactions on Energy Conversion**.

- Osborn Dale and Ray Richins. 1999. Voltage Regulation System During Large Motor Starting and Operation. **IEEE**.
- Pahwa Anil and Thomas R. Ward. 1992. Teaching Power System Protection With Industry's Cooperation. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 7, No. 1.
- Petro, David W. and Raoul L. Wood. 2004. Power Quality Issues Regarding Adjustable Speed Drives in Petroleum Terminals. **IEEE**.
- Phipps, James K., John P. Nelson and Pankaj K. Sen. 1994. Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution System. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 30, No. 2.
- Piwko, R.J., C.A. Wegner, B.C. Furumasu, B.L. Damsky and J.D. Eden. 1994. The Slatt Thyristor-Controlled Series Capacitor Project - Design, Installation, Commissioning and System Testing. **CIGRE**, 14-104, 28 August - 3 September.
- Pouliquen, H.; Le Bitoux, M.; Schmitt, A. and Deflandre, T. 1993. Disturbances generated by power rectifiers: existing solutions and future prospects. **CIREN**. 12th International Conference.
- Preville, Guillaume de. 2005. **Dynamic Damping with Power Electronics: Industrial Cases**. Dresden EPE.
- Railing, B. D., J.J. Miller, P. Steckley, G. Moreau, P. Bard, L. Ronstrom and J. Lindberg. 2004. Cross Sound Cable Project Second Generation VSC Technology for HVDC. **CIGRE**, B4-102.
- Reed, Gregory F. and Masatoshi Takeda. 2000. Applications of Voltage Source Inverter (VSI) Based Technology for FACTS and Custom Power Installations. **IEEE**.

- Reilly, S. and J. Monaghan. 1994. Protection Upgrading - A Utility Perspective. **CIGRE**, 34-204, 28 August - 3 September.
- Renz, B.A., A.J.F. Keri, A.S. Mehraban, J.P. Kessinger, C.D. Schauder, L. Gyugyi, L.J. Kovalsky and A.A. Edris. 1998. World's First Unified Power Controller on the AEP System. **CIGRE**, 14-107.
- Salman, S.K. and A.R. Mollah. 2006. Detecting, Locating and Identifying The Type of Faults on The Interfacing Link Between an Industrial Cogenerator and Utility. **IEEE**.
- Savolac, M.P., K. Tekletsadik and A. Rowley. 1998. High temperature superconducting current limiting series reactor. **CIGRE**, 12-307.
- Schauder Colin. 1999. STATCOM for Compensation of Large Electric Arc Furnace Installations. **IEEE**.
- Schlabach, J. 2005a. Disturbance Emission of Medium Frequency Converter for Melting Ovens in MV Systems. **IEEE ISIE**, June 20-23.
- _____. 2005b. Improvement of Power Quality for 6 kV Industrial Power System with Motor Load. **IEEE ISIE**.
- Schmid Eberhard. 1997. **Metals, Mining & More**. Siemens, July 3.
- Schmitt, H., N. Christl, R. Gampenrieder, K. Liegl and H. Gartmair. 2006. System Performance and Basic Design Aspects for the Etzenricht 600 MW Back to Back HVDC Converter Station. **IEEE**.
- Schmitt, O., M. Hausler, T. Hammerschmidt and B. Ratering-Schnitzler. 2002. Customized Power Quality Improvement in Distribution System. **CIGRE**, 14-113.

- Schreiber, Helen. 1991. The Application of a Vector Controlled AC Drive for Internal Batch Mixing of rubber Compounds. **IEEE**.
- Smith, K.S. 2005. Transformer Inrush Studies for Wind farm Grid Connections. **International Conference on Power Systems Transients in Montreal Canada**. June 19-23.
- Sorensen, P.L., B. Franzen, J.D. Wheeler, R.E. Bonchang, C.D. Barker, R.M. Preedy and M.H. Baker. 2004. Konti-Skan 1 HVDC Pole Replacement. **CIGRE**, B4-207.
- Sottiele, Joseph., Steve Gnappagasam, Thomas Novak and J. L. Kohler. 2005. Detrimental Effects of Capacitance on High-Resistance-Grounded Mine Distribution Systems. **IEEE**.
- Soysal, Oguz A. 1998. Protection of Arc Furnace Supply Systems From Switching Surges. **IEEE**.
- Stade, D., H. Schau and St. Prinz. 2000. Influence of The Current Control Loops of DC Arc Furnaces on Voltage Fluctuations and Harmonics in the HV Power Supply System. **IEEE**.
- _____, _____, _____ and M. Malsch. 2002. Special Aspects of Flickers Compensation in MV Power Supply Systems with rapidly Fluctuating Active Loads. **IEEE**.
- Steimer, Peter K., Horst E. Gruning, Johannes Werninger and Dierk Schroder. 1998. State of the Art Verification of the Hard Driven GTO Inverter Development for a 100 MVA Intertie. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Vol. 13, No. 6.
- Subramanian, Seshadri, X. Y. Chao, Sujit Mandal, Douglas Mader, Sharma Kolluri, Jacques Lemay and Raymon D. Powell. 2003. Effective Short Circuit Mitigation Using Interphase Power Controller Technology: System Planning and Engineering Considerations. **IEEE**.

- Tang, Le., Sharma Kolluri and Mark F. McGranaghan. 1997. Voltage Flicker Prediction for Two Simultaneously Operated AC Arc Furnaces. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 12, No. 2.
- Taylor, G. A., J. E. Hill, A. B. Burden and K. Mattern. 1998. Responding to the Changing Demands of Lower Voltage Networks The Utilisation of Custom Power System. **CIGRE**, 14-303.
- Thallam, R.S., 1992. Review of the design and performance features of HVDC system connected to low short circuit ratio AC system. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Vol. 7, No. 4.
- Thiringer, Torbjorn. 1996. Power Quality Measurements Performed on a Low Voltage Grid Equipped Two Wind Turbines. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 11, No.3.
- _____, Tomas Petru and Christer Liljegren. 2001. Power Quality Impact of a Sea Located Hybrid Wind Park. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 16, No. 2.
- _____, _____ and Stefan Lundberg. 2004. Flicker Contribution From Wind Turbine Installation. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 19, No.1.
- Thunberg, E. and L. Soder. 1998. A Harmonic Norton Model of a real Distribution Network. **IEEE**.
- Trebst, R. and H. Wohlfarth. 2006. Modernisation of a Regional Energy Distribution network. **IEEE**.

- Tyll, H. K., G. Huesmann, K. Habur, K. Stump, W. H. Elliott and F. E. Trujillo. 1994. Design Considerations for the Eddy County Static Var Compensator. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 9, No. 2.
- Ventruella, Del J. and Jack Traill. 1994. Cascade Ground Fault Investigation. **IEEE**.
- Vigneau, Pierre, Jean Marie Destombes, Rolf Grunbaum, Tomas Gustafsson, Jean Philippe Hasler and Anders Persson. 2006. SVC for Load Balancing and Maintaining of Power Quality in an Island Drid Feeding a Nickel Smelter. **IEEE**.
- Wheeler, N. Y., H. Zhang and D. A. Grant. 1994. Minimisation of Reactive Component Values in Back to Back Converters. **IEE**.
- Wood, Barry M., Cecil M. King, Per L. Eriksson, Josef Schleuniger and Esa Virtanen. 2004. Ten Years of Operating Experience with a 15000 HP 6000 r/min Adjustable Speed Drives. **IEEE**.
- Yacamini, R., L. Hu and R. A. Fallaize. 1990. Calculation of Commutation Spikes and Harmonics on Offshore Platforms. **IEE Proceedings**, Vol. 137, Pt. B, No. 1.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายทรงยศ บุญปิ่น
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 21 มิถุนายน 2525
สถานที่เกิด	จังหวัดสิงห์บุรี
ประวัติการศึกษา	ปี 2548 ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร ระดับ 4
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 3 (ภาคเหนือ)

