

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม

นายปานทอง ถินสถิตย์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-440-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HARMONIC ANALYSIS FOR INDUSTRIAL  
POWER SYSTEMS

Mr. Pantong Thinsatit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

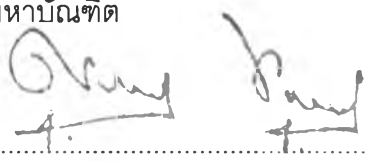
Academic Year 1998

ISBN 974-331-440-7

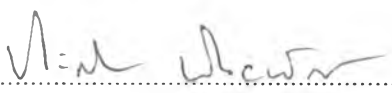
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม  
โดย นาย ปานทอง ถินสถิตย์  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ไชยะ แซ่ม้อย

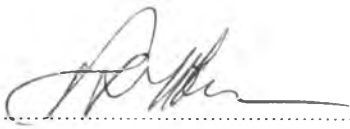
---


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
( ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติววงศ์ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ )

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อาจารย์ ไชยะ แซ่ม้อย )

  
..... กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ )

  
..... กรรมการ  
( นาย พงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์ )

พิมพ์ต้นฉบับบทความโดยวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ปานทอง ถินสถิตย์ : การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม

(HARMONIC ANALYSIS FOR INDUSTRIAL POWER SYSTEMS)

อ.ที่ปรึกษา : อ.ไชยะ แซ่มช้อย ; 145 หน้า. ISBN 974-331-440-7

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม โดยการวิเคราะห์จะมุ่งเน้นที่การไหลของกระแสฮาร์มอนิกภายในโรงงาน ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มจากการสร้างเมตริกซ์ความนำที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการวิเคราะห์ ( $Y_h$ ) จากนั้นจึงคำนวณหาค่าแรงดันฮาร์มอนิก ( $V_h$ ) โดยกำหนดให้แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมีคุณสมบัติเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก ( $I_h$ )

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาี้ สามารถใช้วิเคราะห์หาแรงดันฮาร์มอนิกของแต่ละบัส กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านไปยังอุปกรณ์ และ จุดต่อร่วม (PCC) อิมพีแดนซ์สมมูลของแต่ละบัส (เพื่อวิเคราะห์จุดเรโซแนนซ์) และ อัตราขยายกระแส (Amplification factor)

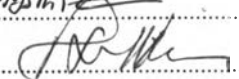
นอกจากนี้ โปรแกรมยังสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่ก่อนแล้วในระบบจ่ายไฟ (Background harmonic voltage) การเพิ่มอุปกรณ์ใหม่เข้ามาในโรงงาน การติดตั้งชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลัง หรือ การติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก เป็นต้น และยังสามารถนำผลการวิเคราะห์นี้ไปประเมินกับค่ามาตรฐานทางด้านฮาร์มอนิกได้

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา ..... พ.ศ. 2541

ลายมือชื่อนิติ ..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกหาร่วม .....

# #3972851221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD:

HARMONIC ANALYSIS / INDUSTRIAL POWER SYSTEMS  
PANTONG THINSATIT : HARMONIC ANALYSIS FOR INDUSTRIAL POWER SYSTEMS. THESIS ADVISOR : CHAIYA CHAMCHOY 145 pp.  
ISBN 974-331-440-7

This thesis presents harmonic analysis for industrial power systems, focusing on harmonic current flow within the industry. The procedure starts from admittance matrix formed at harmonic frequency ( $Y_h$ ), Then calculate harmonic voltage ( $V_h$ ), while harmonic sources are defined as harmonic current source ( $I_h$ ).

The developed software can analyze harmonic voltage ( $V_h$ ) at each bus, harmonic current flow through any equipments and the point of common coupling (PCC), equivalent impedance at each bus (for resonance analysis), and an amplification factor.

In addition, this software can analyze the effect of background harmonic voltage, adding additional devices to industrial system, and installation of power factor correction capacitor or harmonic filter. The result from the analysis can be also assess with harmonic standards.

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา.....พ.ศ. 2541

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ อาจารย์ไชยะ แซ่มซ้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ และคุณพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

อนึ่ง เนื่องจากทุนการศึกษาในระดับปริญญาโททั้งหมดนี้ ได้รับการสนับสนุนจาก การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย ที่ได้เล็งเห็นความสำคัญต่อการศึกษาระดับสูงของพนักงานการไฟฟ้าเอง ซึ่งจะเป็นการวางรากฐานที่สำคัญอันจะนำไปสู่การพัฒนาของหน่วยงานและประเทศไทย อย่างแท้จริง

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา - มารดาที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา และทุก ๆ ท่านที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ปานทอง ถินสถิตย์

เมษายน 2542

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ด
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 แนวเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตโครงการวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	3
2. การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม.....	5
2.1 การวิเคราะห์ด้วยวงจรสมมูล.....	5
2.2 การวิเคราะห์โดยการใช้ เมตริกซ์ความนำ (Admittance Matrix : $Y_{BUS}$ ).....	9
2.3 แบบจำลองของอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม.....	10
2.3.1 โครงข่ายระบบจ่ายไฟของการไฟฟ้าที่โรงงานต่ออยู่.....	11
2.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้า.....	11
2.3.3 โหลดเชิงเส้น.....	12
2.3.4 มอเตอร์.....	13
2.3.5 สายเคเบิลหรือสายส่งย่อยภายในโรงงาน.....	13
2.3.6 คาปาซิเตอร์.....	14
2.3.7 ตัวกรองฮาร์มอนิก.....	14
2.3.8 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....	16

2.4	ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก.....	18
2.5	ขั้นตอนการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม.....	18
3.	การประเมินหาระดับกระแสฮาร์มอนิก.....	22
3.1	การประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกจากเครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต (คอนเวอร์เตอร์).....	23
3.1.1	คอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติ.....	24
3.1.2	คอนเวอร์เตอร์แบบไม่เป็นอุดมคติ.....	27
3.2	การประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์ ตาม มาตรฐาน IEC1000-2-6.....	39
3.2.1	คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส จ่ายให้กับ โหลดกระแสตรง โดยไม่คิดผลการ กระเพื่อมของกระแส.....	40
3.2.2	คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส จ่ายให้กับ โหลดกระแสตรง ผ่านตัวกรอง L-C.....	45
3.2.3	คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส จ่ายให้กับ โหลดกระแสตรง โดยมี คาปาซิเตอร์ต่อขนานอยู่ด้านขาออก.....	45
4.	การพัฒนาโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม.....	48
4.1	วัตถุประสงค์ของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น.....	48
4.2	ไดอะแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อใช้วิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในโรงงาน.....	49
4.3	การวิเคราะห์จุดเรโซแนนซ์ และ อัตราการขยายกระแส.....	50
4.4	การแบ่งกลุ่มของสวิตช์ของโปรแกรม.....	51
4.5	ตัวอย่างการเลือกอุปกรณ์เพื่อสร้างไดอะแกรมที่ต้องการวิเคราะห์.....	51
5.	โครงสร้างของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น.....	55
5.1	สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม.....	55
5.2	การป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม.....	56
5.3	การแสดงผลของโปรแกรม.....	62
6.	มาตรฐานและการตรวจวัดฮาร์มอนิก.....	71
6.1	มาตรฐาน IEEE Std.519-1992.....	71
6.1.1	แนวปฏิบัติสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย.....	72
6.1.2	แนวปฏิบัติสำหรับการไฟฟ้า.....	74
6.2	มาตรฐาน G.5/3 - 1976.....	75



6.3	มาตรฐาน IEC 1000-2-2-1990 และ IEC 1000-2-4-1994.....	77
6.3.1	มาตรฐาน IEC 1000-2-2-1990.....	77
6.3.2	มาตรฐาน IEC 1000-2-4-1994.....	78
6.4	ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม ของการไฟฟ้าในประเทศไทย (กฟภ. กฟน. กฟผ.).....	80
6.4.1	ขอบเขตของข้อกำหนด.....	81
6.4.2	วัตถุประสงค์ของข้อกำหนด.....	81
6.4.3	ค่าจำกัดของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก.....	81
6.4.4	การบังคับใช้.....	82
6.5	การตรวจวัดฮาร์มอนิก.....	84
6.5.1	จุดตรวจวัด.....	84
6.5.2	คุณลักษณะของสัญญาณที่ตรวจวัด.....	86
6.5.3	ช่วงเวลาในการตรวจวัด.....	88
6.5.4	ช่วงเวลาการตรวจวัดตามข้อกำหนดของการไฟฟ้า.....	88
6.5.5	การนำเสนอผลการตรวจวัด.....	88
6.6	เครื่องมือวัดฮาร์มอนิก.....	90
7.	ตัวอย่างการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม.....	92
7.1	การวิเคราะห์เบื้องต้น.....	92
7.1.1	วิเคราะห์เปรียบเทียบขนาดของแหล่งกำเนิดกับระบบ.....	92
7.1.2	วิเคราะห์หาจุดที่จะเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน.....	93
7.2	ตัวอย่างการวิเคราะห์.....	94
8.	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	135
	รายการอ้างอิง.....	137
	ภาคผนวก.....	138
	ก. ตัวอย่างผลการตรวจวัดปริมาณฮาร์มอนิกของโรงงานอุตสาหกรรม.....	139
	ประวัติผู้เขียน.....	145

## สารบัญญัตินี้

ตารางที่	หน้า
2.1 แบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	17
3.1 ขนาดกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติ.....	26
3.2 ตัวอย่างขนาดกระแสฮาร์โมนิกจากคอนเวอร์เตอร์ แบบ 6 พัลส์ เมื่อ ค่ามุม $\alpha$ และ $\mu$ แปรเปลี่ยนไป และ $X_c = 8\%$ .....	29
3.3 เปรียบเทียบกระแสฮาร์โมนิกจากคอนเวอร์เตอร์ แบบ 6 พัลส์ เมื่อประเมินด้วยวิธีการต่างๆ ด้วยเงื่อนไขเดียวกัน.....	37
3.4 วิธีการที่เหมาะสมที่ใช้ประเมินกระแสฮาร์โมนิกในสภาวะการกระเพื่อมที่ต่างกัน.....	38
3.5 พารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณาสำหรับการประเมินในแต่ละวิธี.....	39
3.6 ขนาดของกระแสฮาร์โมนิก เมื่อ ค่าการกระเพื่อมต่ำ.....	42
3.7 ขนาดของกระแสฮาร์โมนิก เมื่อ ค่าการกระเพื่อมปานกลาง.....	42
3.8 ขนาดของกระแสฮาร์โมนิก เมื่อ ค่าการกระเพื่อมสูง.....	43
3.9 กระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจากวงจรเรียงกระแสของไดโอด และ มีคาปาซิเตอร์ต่อขนานอยู่ด้านขาออก.....	46
5.1 สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม.....	56
5.2 การคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่หลักมูล.....	61
6.1 ค่าจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกตาม IEEE Std.519-1992.....	72
6.2 ค่าจำกัดแรงดันฮาร์โมนิกตาม IEEE Std.519-1992.....	74
6.3 ขนาดใหญ่ที่สุดของเครื่องแปลงผันกำลัง และ A.C. regulator แต่ละตัวภายใต้ ค่าจำกัดของขั้นตอนที่ 1.....	76
6.4 ค่าจำกัดกระแสฮาร์โมนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จุด PCC ภายใต้ข้อจำกัด ของขั้นตอนที่ 2.....	76
6.5 ค่าจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกที่จุดใดๆในระบบ.....	77
6.6 ค่าจำกัดของระดับแรงดันฮาร์โมนิกสำหรับแรงต่ำ (415/240 Volt).....	78
6.7 ค่าจำกัดของระดับฮาร์โมนิกในแต่ละลำดับ(ไม่รวม ฮาร์โมนิกที่เป็นผลพหุคูณ 3 ).....	79

6.8 ค่าจำกัดของระดับฮาร์โมนิกในแต่ละลำดับ(ฮาร์โมนิกที่เป็นผลพหุคูณ 3 ).....	80
6.9 ค่าจำกัดของแรงดันฮาร์โมนิกผิดเพี้ยนรวม (THD).....	80
6.10 เปรียบเทียบข้อกำหนดกระแสฮาร์โมนิกและแรงดันฮาร์โมนิก ตามมาตรฐานที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้.....	80
6.11 ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกสำหรับผู้ให้บริการรายใดๆที่จุดต่อร่วม (PCC).....	81
6.12 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกของแรงดันสำหรับผู้ให้บริการรายใดๆ ที่จุดต่อร่วม (รวมทั้งระดับความเพี้ยนที่มีอยู่เดิม).....	82
6.13 ค่าความผิดพลาดที่ทำให้เกิดมากที่สุดของการวัดตามมาตรฐาน IEC-1000-4-7.....	91
7.1 ค่าองค์ประกอบการถ่วง (Weighting Factor) สำหรับการพิจารณา การยอมรับโดยอัตโนมัติ.....	93
7.2 ข้อมูลตัวอย่างที่ 1	
7.2(ก) ข้อมูลเบื้องต้น.....	95
7.2(ข) ข้อมูลกระแสฮาร์โมนิกจากคอนเวอร์เตอร์.....	95
7.3 ผลการคำนวณ	
7.3(ก) ผลการคำนวณแรงดันฮาร์โมนิก.....	96
7.3(ข) ผลการคำนวณการไหลของกระแสฮาร์โมนิก.....	97
7.4 ขนาดของคาปาซิเตอร์ที่ระดับโหลดต่างๆ.....	98
7.5 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์โมนิก เมื่อโหลดและ kVAr ของชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลัง เปลี่ยนแปลง.....	99
7.6 ผลการคำนวณกระแสฮาร์โมนิก	
7.6(ก) ผลการคำนวณการไหลของกระแสฮาร์โมนิก เมื่อ Capbank = 500 kVAr.....	100
7.6(ข) ผลการคำนวณการไหลของกระแสฮาร์โมนิก เมื่อ Capbank = 700 kVAr.....	101
7.6(ค) ผลการคำนวณการไหลของกระแสฮาร์โมนิก เมื่อ Capbank = 800 kVAr.....	102
7.7 ข้อมูลแรงดันฮาร์โมนิกจากแหล่งจ่าย (Background harmonic voltage).....	104
7.8 ผลการคำนวณแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกเมื่อแหล่งจ่ายไฟมีแรงดันฮาร์โมนิก (Back ground harmonic voltage) และขนาด Capbank = 800 kVAr.....	105
7.9 สรุปค่าความผิดเพี้ยนรวม	
7.9(ก) สรุปค่าแรงดันฮาร์โมนิกผิดเพี้ยนรวม (THD <sub>v</sub> ).....	104

7.9(ข) สรุปค่ากระแสฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวม (THD <sub>r</sub> ).....	104
7.10 ผลการคำนวณแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก เมื่อใช้ตัวกรองฮาร์มอนิก แบบ พาสซีฟ ชนิดปรับคลื่นเดี่ยว ลำดับที่ 5 และ 7.....	108
7.11 เปรียบเทียบ ค่า THD <sub>v</sub> และ THD <sub>r</sub> เมื่อใช้ตัวกรองฮาร์มอนิก แทนคาปาซิเตอร์.....	107
7.12 ข้อมูลตัวอย่างที่ 2	
7.12(ก) ข้อมูลเบื้องต้นของตัวอย่างที่ 2.....	110
7.12(ข) ข้อมูลของกระแสฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์.....	111
7.13 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบไม่มีคาปาซิเตอร์ (กรณีที่ 1).....	112
7.14 ผลการคำนวณการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่อุปกรณ์ต่างๆ เมื่อระบบไม่มีคาปาซิเตอร์ (กรณีที่ 1).....	113
7.15 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบมีคาปาซิเตอร์ด้านแรงสูง (กรณีที่ 2).....	114
7.16 ผลการคำนวณการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบมีคาปาซิเตอร์ด้านแรงสูง (กรณีที่ 2).....	115
7.17 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบมีคาปาซิเตอร์ด้านแรงต่ำ (กรณีที่ 3).....	116
7.18 ผลการคำนวณการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบมีคาปาซิเตอร์ด้านแรงต่ำ (กรณีที่ 3).....	117
7.19 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบมีคาปาซิเตอร์ทั้งด้าน 115 kV และ 400 V (กรณีที่ 4).....	118
7.20 ผลการคำนวณการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบมีคาปาซิเตอร์ด้าน 115 kV และ 400 V (กรณีที่ 4).....	119
7.21 สรุปผลการคำนวณ	
7.21(ก) สรุปค่า THD <sub>v</sub> (% of V <sub>r</sub> ) ของแต่ละบัส ในกรณีต่างๆ.....	120
7.21(ข) สรุปค่า THD <sub>r</sub> (% of I <sub>r</sub> ) ของอุปกรณ์ ในกรณีต่างๆ.....	120
7.22 ผลการคำนวณกระแสที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์ เมื่อคิดจากแหล่งกำเนิดที่ละจุด.....	126

7.23 ผลการคำนวณเมื่อใช้ตัวกรอง	
7.23(ก) ผลการคำนวณกระแสที่ไหลผ่านตัวกรอง คาปาซิเตอร์ และไหลเข้าสู่ระบบ โดยคิดผลจากแหล่งกำเนิดทั้ง 2 (SPC #1+SPC #2).....	128
7.23(ข) ผลการคำนวณกระแสที่ไหลผ่านตัวกรอง คาปาซิเตอร์ และไหลเข้าสู่ระบบ โดยคิดผลจากแหล่งกำเนิดทั้ง 2 (SPC #1+SPC #2) และ แรงดันฮาร์มอนิกจาก แหล่งจ่ายไฟ (Back ground harmonic voltage).....	129
7.24 เปรียบเทียบค่า $THD_V$ และ $THD_I$ (ของคาปาซิเตอร์ที่บัส 4) เมื่อใช้คาปาซิเตอร์ กับเมื่อใช้ตัวกรองทางด้านแรงสูง.....	127
7.25 แสดงผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 3.....	131
7.26 เปรียบกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบ เมื่อโรงงานที่ 1 ทำงานแห่งเดียว และ เมื่อโรงงานทั้ง 2 ทำงานพร้อมกัน.....	132
7.27 ผลการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิก ผ่านไปยังโรงงานที่ 2 (แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก อยู่ที่โรงงานที่ 1).....	134

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก แบบที่ 1.....	5
2.2 ระบบโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก แบบที่ 2.....	7
2.3 ระบบโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก แบบที่ 3.....	7
2.4 วงจรสมมูลของรูปที่ 2.3 เพื่อนำมาสร้าง $Y_{BUS}$ .....	9
2.5 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ.....	16
2.6 วงจรสมมูลของของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....	17
2.7 แผนผังขั้นตอนการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม.....	21
3.1 วงจรของคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ 3 เฟส.....	24
3.2 รูปคลื่นกระแสของคอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติ.....	25
3.3 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติที่ความถี่ฮาร์มอนิก.....	25
3.4 ลักษณะกระแสของคอนเวอร์เตอร์เมื่อคำนึงถึงการเกิดคอมมิวเตชัน.....	28
3.5 ขนาดกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 โดยสัมพันธ์กับมุม $\alpha$ และ $\mu$ .....	30
3.6 ขนาดกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 โดยสัมพันธ์กับมุม $\alpha$ และ $\mu$ .....	30
3.7 ขนาดกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 โดยสัมพันธ์กับมุม $\alpha$ และ $\mu$ .....	31
3.8 ขนาดกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 13 โดยสัมพันธ์กับมุม $\alpha$ และ $\mu$ .....	31
3.9 ตัวอย่างกระแสด้านขาเข้าของคอนเวอร์เตอร์เมื่อคิดผลการกระเพื่อมของกระแสไฟตรง..	32
3.10 ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสขาเข้า ที่ ขดลวด D.C.link ขนาดต่างๆ.....	32
3.11 ลักษณะของรูปคลื่นกระแสที่มีการกระเพื่อม.....	33
3.12 กระแสฮาร์มอนิกด้านขาเข้าของคอนเวอร์เตอร์ แบบ 6 พัลส์ กับอัตราส่วน การกระเพื่อม.....	34
3.13 นิยามของตัวแปรที่ใช้ในสมการที่(3.16,3.16).....	35
3.14 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 จากคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ ที่มีการกระเพื่อม ของไฟฟ้ากระแสตรง.....	35
3.15 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 จากคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ ที่มีการกระเพื่อม	

ของไฟฟ้ากระแสตรง.....	36
3.16 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 จากคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ ที่มีการกระเพื่อม ของไฟฟ้ากระแสตรง.....	36
3.17 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 13 จากคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ ที่มีการกระเพื่อม ของไฟฟ้ากระแสตรง.....	38
3.18 ไดอะแกรมของวงจรคอนเวอร์เตอร์ตาม IEC-1000-2-6.....	40
3.19 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 โดยสัมพันธ์กับ ค่า $R_{SC}$ , $\alpha$ และ Smoothing ratio.....	41
3.20 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 โดยสัมพันธ์กับ ค่า $R_{SC}$ , $\alpha$ และ Smoothing ratio.....	42
3.21 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสในกรณีหม้อแปลงต่อแบบ Y/Y หรือ D/D.....	44
3.22 สเปคตรัมของกระแสในกรณีหม้อแปลงต่อแบบ Y/Y หรือ D/D.....	44
3.23 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสในกรณีหม้อแปลงต่อแบบ Y/D หรือ D/Y.....	44
3.24 สเปคตรัมของกระแสในกรณีหม้อแปลงต่อแบบ Y/D หรือ D/Y.....	45
3.25 คอนเวอร์เตอร์ที่ต่อคาปาซิเตอร์ด้านขาออก.....	46
3.26 ความสัมพันธ์ของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และ กับค่า $R_{SC}$ .....	46
4.1 ไดอะแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในโรงงาน.....	49
4.2 การเลือกใช้อุปกรณ์และสวิตช์ในส่วนที่ 1 (เพื่อสร้างไดอะแกรมของโรงงานตามรูปที่ 2.1).....	52
4.3 การเลือกใช้อุปกรณ์และสวิตช์ในส่วนที่ 1 และ 2 (เพื่อสร้างไดอะแกรมของโรงงานตามรูปที่ 2.2).....	52
4.4 การเลือกใช้อุปกรณ์และสวิตช์ในส่วนที่ 1 และ 2 (เพื่อสร้างไดอะแกรมของโรงงานตามรูปที่ 2.3).....	53
5.1 หน้าจอหลัก (Main program) ให้ผู้ใช้เลือกสร้างไดอะแกรมที่ต้องการวิเคราะห์.....	59
5.2 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของอุปกรณ์(ป้อนได้เฉพาะส่วนที่ถูกเลือก).....	59
5.3 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของคอนเวอร์เตอร์(แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก).....	60
5.4 หน้าจอส่วนป้อนข้อมูลของแรงดันฮาร์มอนิกจากการแหล่งจ่ายไฟ (Back ground harmonic voltage).....	60
5.5 หน้าจอส่วนแสดงผลสเปคตรัมของแรงดันฮาร์มอนิก (ค่าจริง).....	62
5.6 หน้าจอส่วนแสดงผลสเปคตรัมของแรงดันฮาร์มอนิก (% of $V_1$ ).....	63

5.7 หน้าจอส่วนแสดงผลสเปคตรัมของกระแสฮาร์มอนิก(ค่าจริง) ที่ไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ.....	63
5.8 หน้าจอส่วนแสดงผลสเปคตรัมของกระแสฮาร์มอนิก(ค่าจริง)ที่ไหลผ่านจุด PCC.....	64
5.9 หน้าจอส่วนแสดงผลของแรงดันฮาร์มอนิก(แบบตาราง)ที่บัสต่างๆ.....	64
5.10 หน้าจอส่วนแสดงผลของกระแสฮาร์มอนิก(แบบตาราง)ที่อุปกรณ์ต่างๆ.....	65
5.11 หน้าจอส่วนแสดงผลของกระแสฮาร์มอนิก(แบบตาราง)ที่อุปกรณ์ต่างๆ (เมื่อเลือกปุ่ม Next).....	65
5.12 หน้าจอส่วนแสดงผลของอิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆที่ PCC บัส.....	66
5.13 หน้าจอส่วนแสดงผลของอิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของบัสที่ 2.....	66
5.14 หน้าจอส่วนแสดงผลของอิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของบัสที่ 6.....	67
5.15 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆเมื่อคิดผลการเปลี่ยนแปลงขนาด kVAr Cap.....	68
5.16 ไดอะแกรมที่ใช้ศึกษาการหาอัตราขยายกระแส.....	68
5.17 แสดงอัตราขยายกระแสที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ระหว่างโรงงาน.....	69
5.18 แผนผังการทำงานโดยรวมของโปรแกรม.....	70
6.1 แผนผังแสดงวิธีการบังคับใช้ข้อกำหนดของการไฟฟ้า.....	83
6.2 ตำแหน่งของจุดต่อร่วม (PCC).....	85
6.3 ตัวอย่างตำแหน่งการเลือกจุดตรวจวัดฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม.....	86
6.4 ตัวอย่างการแสดงผลการตรวจวัดฮาร์มอนิก.....	89
6.5 ตัวอย่างโครงสร้างของเครื่องวัดฮาร์มอนิกที่ใช้หลักการ FFT.....	90
7.1 ไดอะแกรมของโรงงานสำหรับตัวอย่างที่ 1.....	94
7.2 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆเมื่อค่ากำลังไฟฟ้าย้อนที่เปลี่ยนแปลง.....	103
7.3 แสดงสเปคตรัมของกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 ถูกขยาย เนื่องจากเรโซแนนซ์ (กรณี Capbank 800 kVar).....	103
7.4 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของระบบเมื่อใช้คาปาซิเตอร์.....	107
7.5 อิมพีแดนซ์สมมูลของระบบที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆเมื่อใช้ตัวกรองฮาร์มอนิก.....	107
7.6 สเปคตรัมของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าตัวกรองฮาร์มอนิก.....	109
7.7 สเปคตรัมของกระแสฮาร์มอนิกที่จุด PCC.....	109



7.8	ไดอะแกรมของโรงงานสำหรับตัวอย่างที่ 2.....	110
7.9	อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของบัลที่ 2 กรณีที่ 1.....	120
7.10	อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของบัลที่ 3 กรณีที่ 1.....	121
7.11	อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของบัลที่ 4 กรณีที่ 1.....	121
7.12	อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของบัลที่ 2 กรณีที่ 2.....	121
7.13	อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของบัลที่ 3 กรณีที่ 2.....	121
7.14	อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของบัลที่ 4 กรณีที่ 2.....	122
7.15	อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของบัลที่ 2 กรณีที่ 3.....	122
7.16	อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของบัลที่ 3 กรณีที่ 3.....	122
7.17	อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของบัลที่ 4 กรณีที่ 3.....	123
7.18	การกระจายตัวของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 (กรณีที่ 1).....	124
7.19	การกระจายตัวของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 (กรณีที่ 3).....	124
7.20	อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของบัลที่ 2 เมื่อติดตั้งตัวกรองด้านแรงสูง.....	127
7.21	อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของบัลที่ 3 เมื่อติดตั้งตัวกรองด้านแรงสูง.....	127
7.22	อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของบัลที่ 4 เมื่อติดตั้งตัวกรองด้านแรงสูง.....	130
7.23	ไดอะแกรมของโรงงานตัวอย่างที่ 3.....	130
7.24	อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของบัลที่ 2.....	132
7.25	อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของบัลที่ 3.....	133
7.26	กราฟอัตราการขยายกระแส(Amplification Factor) เมื่อแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกต่ออยู่ที่บัลที่ 2.....	133
7.27	กราฟอัตราการขยายกระแส(Amplification Factor) เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกที่บัลที่ 2.....	133