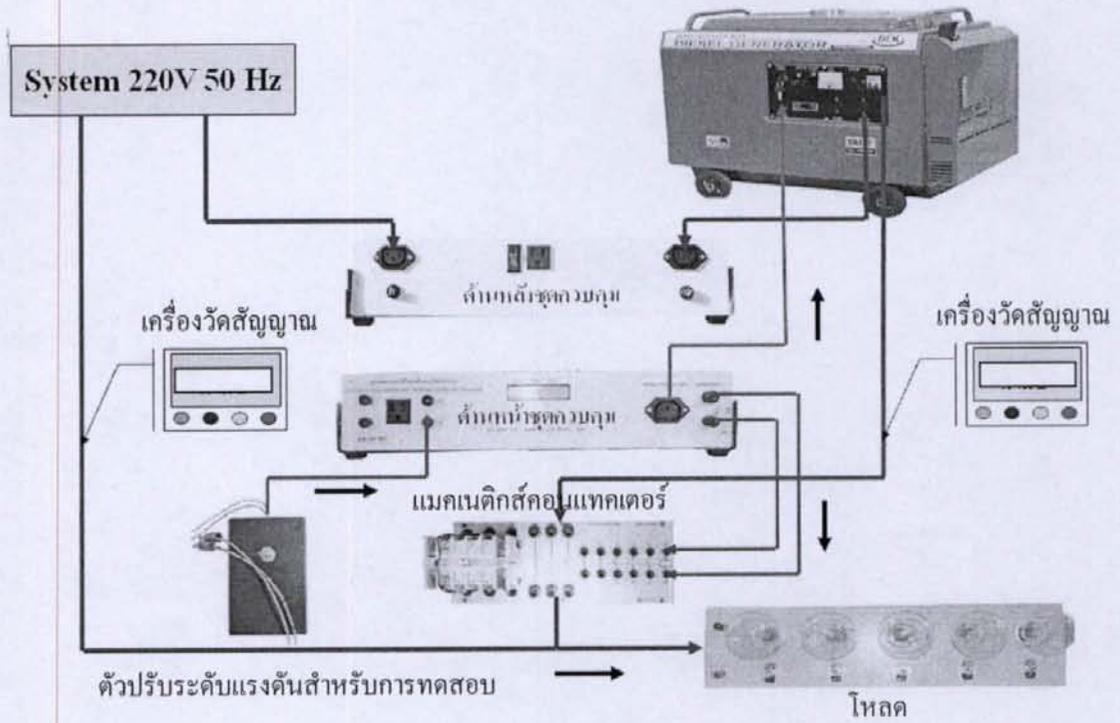


ภาคผนวก

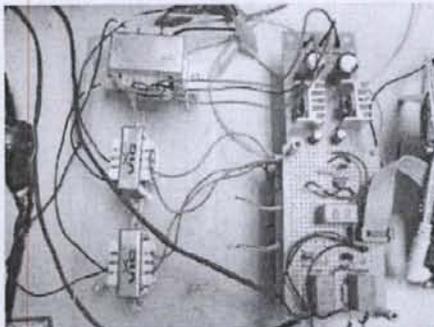
ภาคผนวก ก

ส่วนประกอบของระบบทดสอบ

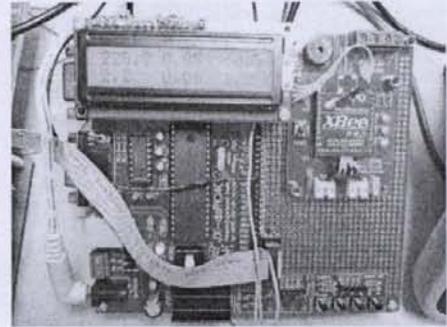
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบใช้เครื่องชนิดเป็นต้นกำเนิด



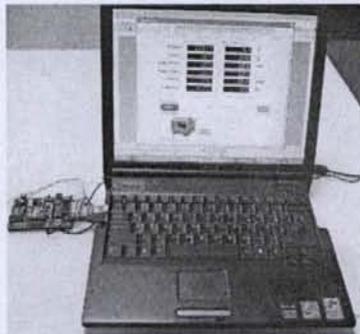
รูปที่ ก.1 ส่วนประกอบของระบบทดสอบ



รูปที่ ก.2 ส่วนวัดสัญญาณ



รูปที่ ก.3 ส่วนประมวลผล



รูปที่ ก. 4 ส่วนแสดงผล

ภาคผนวก ข

ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล



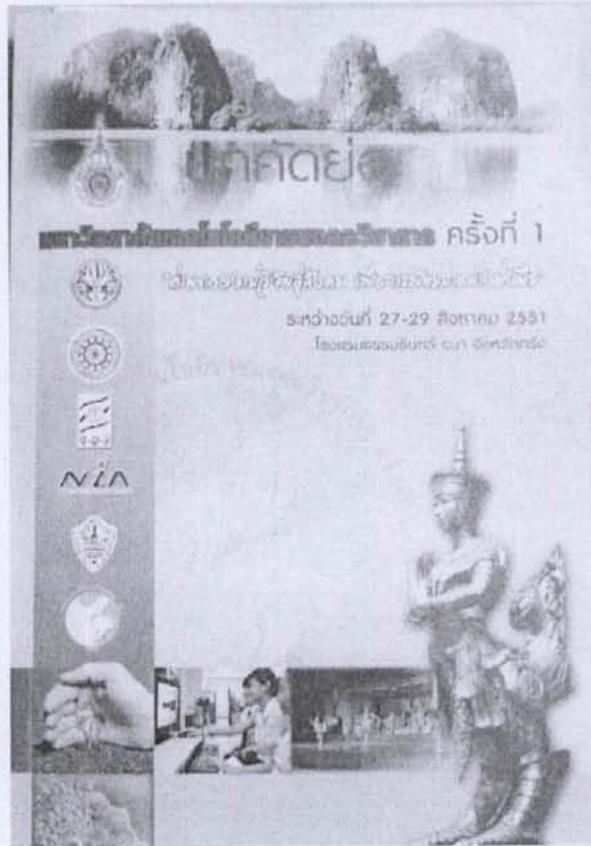
รูปที่ ข.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล

MODEL	DEK3500SL	
ALTERNATOR	Type	Brushless self-exciting single phase alternator
	Frequency HZ	50
	Cont.output KW	3.0
	Max .output KW	3.3
	Voltage regulator	Condenser voltage regulator
	Power factor	1.0
	DC output	12 V × 8.3 A
	Excitation system	Self-excitation
ENGINE	Model	F300
	Type	Air -cooled,direct-injection,4-stroke diesel engine
	Displacement cc.	300
	Fuel tank capacity L	13.5
	Bore (mm)	78
	Stroke (mm)	62
	Operating time hrs	14
	Speed (RPM)	3000
	Continuous output (hp)	5.5
	Max. output (hp)	6.1
	Starting battery	28Ah/12V
	Governor	Centrifugal weight system
	Cooling system	Forced air
	Starting system	Electric start
Oil sensor	standard	
Noise level dBA	77dB(A)at 4 mts	
Dimensions (LXWXH) mm	880x565x780	
Dry Weight kg	143	

ภาคผนวก ค

บทความเผยแพร่

ค.1 การประชุมสัมมนาทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ครั้งที่ 1



รูปที่ ค.1-1 หน้าปกบทความคัดย่อของการประชุม



รูปที่ ค.1-2 ใบแสดงการเข้าร่วมนำเสนอผลงาน

การวิเคราะห์ผลการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซลเข้ากับระบบไฟฟ้า ANALYSIS OF SYNCHRONIZING DIESEL GENERATOR TO ELECTRICAL SYSTEM

สมชาย เปี่ยมสูงเนิน, อาทิตย์ เจริญยิ่ง และ จรัล เกาะแก้ว

Somchai Biansoongnern, Artit Jalernying and Jarun Koskeaw

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซลเข้ากับระบบแบบอัตโนมัติที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ เพื่อทำให้เกิดความระมัดระวังในการตรวจเช็คเงื่อนไขในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบ ซึ่งการขนานเข้ากับระบบจะต้องตรวจสอบ 3 เงื่อนไข คือ ขนาดแรงดัน ความถี่ และมุมต่างเฟส การทดสอบพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ทดสอบกับเครื่องกำเนิดชนิด 1 เฟส ขนาด 3 kW 220 V ด้วยการป้อนโวลต์ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยพบว่าสัญญาณรูปคลื่นแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีฮาร์โมนิกส์ประกอบอยู่ด้วย แต่ปัญหานี้ก็ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบแต่อย่างใด เนื่องจากระบบควบคุมถูกออกแบบให้ตรวจสอบตำแหน่งตัดศูนย์ของสัญญาณแรงดัน ซึ่งทำให้ทราบค่าระดับแรงดันที่ระดับความถี่มูลฐาน และตรวจสอบมุมต่างเฟสได้ถูกต้อง

ABSTRACT

This paper present analysis of synchronizing diesel generator to electrical system. Microcontroller was used to the automatic control for start and synchronizing generator. Condition for synchronizing of electrical generator has three conditions, Voltage Frequency and Phase shift. The performance of the control system is illustrated in single phase generator 3 kW 220 V. Test results have well solution although voltage output of generator have some harmonics.

บทนำ

การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบถือว่ามีควมจำเป็นสำหรับระบบที่มีพลังงานไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ อันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดจนเกินขีดของแหล่งจ่ายที่สามารถจ่ายได้ ซึ่งจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ตัวอย่างเช่น ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าจ่ายพลังงานให้กับโหลดเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ในกรณีที่พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด(กรณีโหลดเพิ่มขึ้น) ก็จะทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซลเข้ากับระบบดังกล่าวเพื่อช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลดที่เพิ่มขึ้น เงื่อนไขสำคัญของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบมีสามข้อ คือ

- 1) แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและที่ระบบที่ขนานเข้าไปต้องมีขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

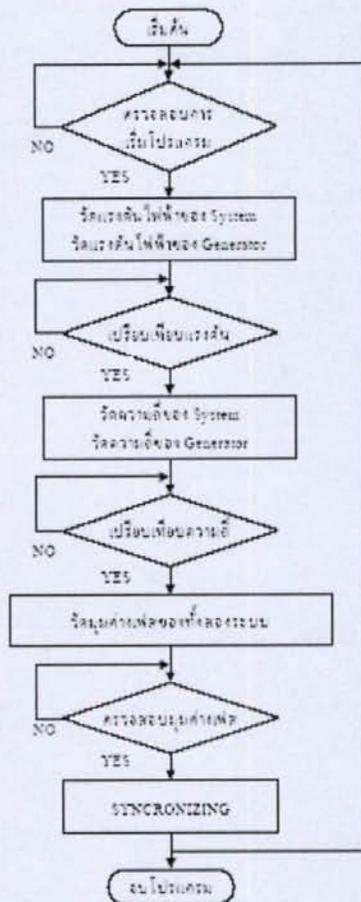
2) ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและที่ระบบที่ขนานเข้าไปด้วยต้องมีเท่ากันโดยประมาณ

3) มุมเฟสจะต้องตรงกัน (In-phase)

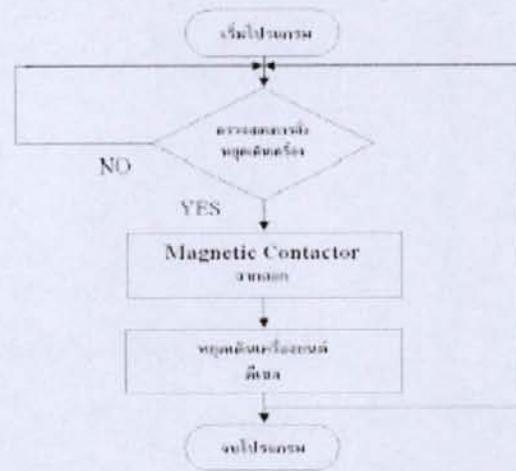
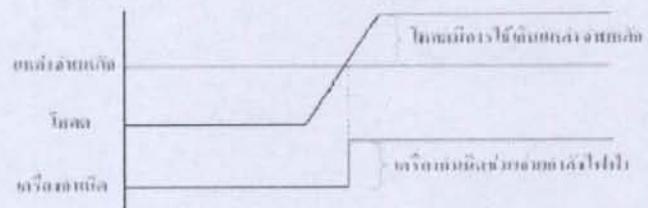
โดยจะต้องทำการขนานที่ตำแหน่ง zero crossing ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดสูงสุดในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบ ในบทความนี้ได้ศึกษาถึงวิธีการควบคุมให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซลสามารถขนานเข้าระบบได้โดยอัตโนมัติด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F458 และศึกษาถึงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังขนานเข้าระบบว่ามีความสามารถขจัดจ่ายพลังงานไฟฟ้า เพื่อเป็นพลังงานสำรองที่ดีต่อระบบมากน้อยเพียงใด และมีความคุ้มค่ากับพลังงานเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่สูงเกินไปต่อพลังงานเอาต์พุตที่สร้างขึ้นมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล

หลักการออกแบบ

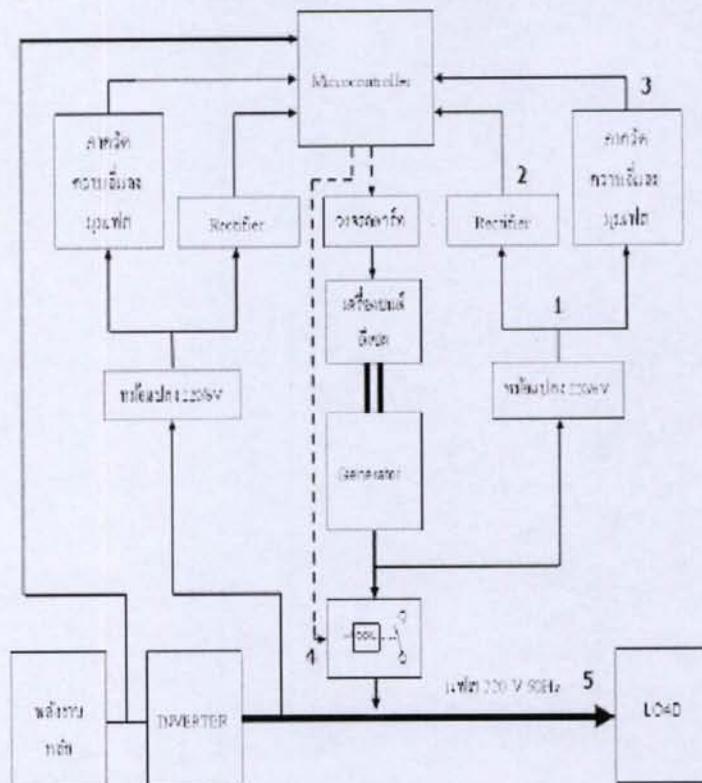
ขั้นตอนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซลเข้าระบบแบบอัตโนมัติที่นำเสนอในบทความนี้แสดงการทำงานตามผังงาน(Flowchart) ดังรูปที่ 1 และ 2 ส่วนขั้นตอนการทำงานของวงจรควบคุมการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบแสดงได้ตามรูปที่ 3



รูปที่ 1 ผังผังโปรแกรมการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 2 ผังผังการทำงานของโปรแกรมการหยุดเดินเครื่อง



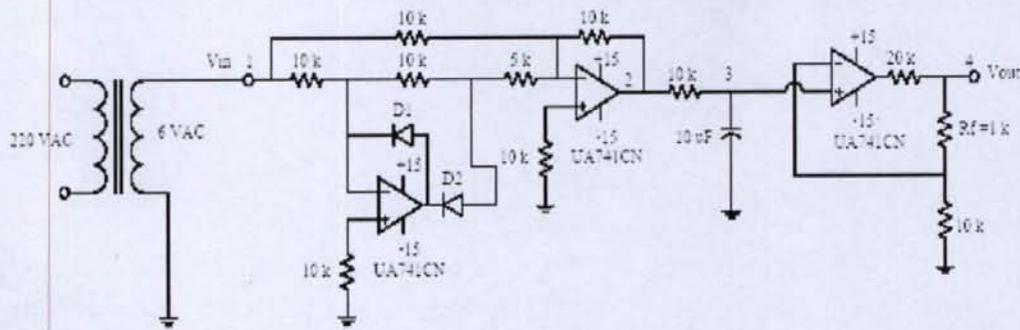
รูปที่ 3 แผนผังการทำงานของวงจรที่นำเสนอ

จากแผนผังการทำงานจะประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส(Rectifier) วงจรเปรียบเทียบมุมเฟสและแรงดัน ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมวงจรสตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล และควบคุม Magnetic Contactor สำหรับต่อขานานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบ

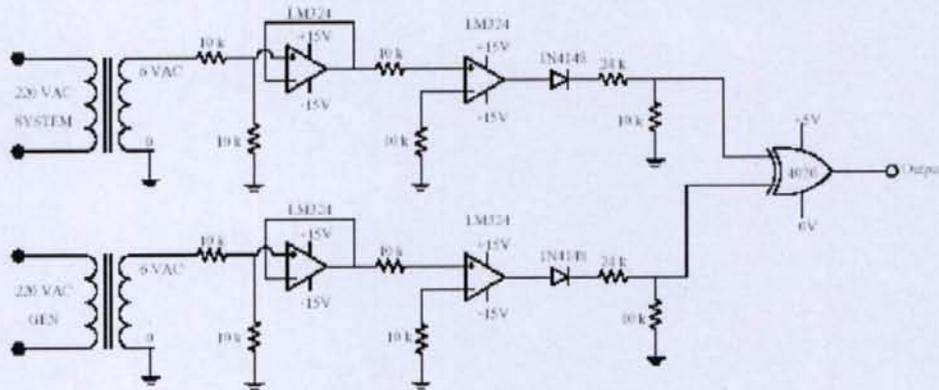
เมื่อระบบมีพลังงานไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด(กรณีที่มีโหลดเพิ่มขึ้น) ไมโครคอนโทรลเลอร์จะตรวจพบความผิดปกตินี้จากพลังงานหลักก่อนเข้าอินเวอร์เตอร์ และจะส่งสัญญาณไปยังวงจรสตาร์ทให้สตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซลให้เดินเครื่องเพื่อรอการสับขานานเข้ากับระบบ และไมโครคอนโทรลเลอร์จะตรวจสอบเงื่อนไขในการขนาน คือ แรงดันไฟฟ้า ความถี่ มุมเฟส ของระบบที่จะขนานเข้าไปกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล และเมื่อตรวจสอบแล้วตรงตามเงื่อนไขในการขนาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะสั่งให้ Magnetic Contactor สับขานานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบเพื่อช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด

เมื่อระบบมีพลังงานเพียงพอต่อความต้องการของโหลดแล้ว(โหลดลดลง)ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะสั่งหยุดเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล(ระบบจ่ายพลังงานแหล่งเดียวตามปกติ) โดยจะสั่ง Magnetic Contactor ให้ปลดเครื่องกำเนิดออกจากระบบ

ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถตรวจสอบเงื่อนไขในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบได้โดยรับสัญญาณ จากวงจรดังต่อไปนี้



รูปที่ 4 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)



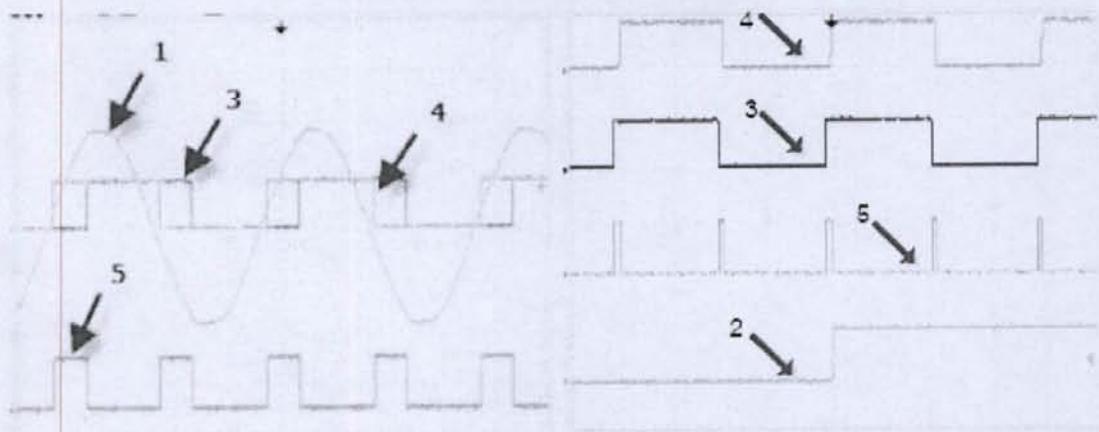
รูปที่ 5 วงจรเปรียบเทียบมุมเฟสและความถี่

1) วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

เนื่องจากกการตรวจสอบเงื่อนไขในการขนานจะต้องตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบเพื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะต้องทำการลดระดับแรงดันจาก 220Vac ให้ลดลงเหลือ 6Vac ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อเป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจรเรียงกระแส (Rectifier) ด้วยออปแอมป์ จากนั้นปรับระดับขนาดสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ให้เหมาะสมสำหรับการนำไปเปรียบเทียบในไมโครคอนโทรลเลอร์

2) วงจรเปรียบเทียบมุมเฟสและความถี่

วงจรเปรียบเทียบมุมเฟสและความถี่ก็เช่นเดียวกับวงจรเรียงกระแส (Rectifier) คือต้องทำการลดระดับจาก 220Vac ให้เหลือ 6Vac ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อเป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจรเปรียบเทียบมุมเฟสและความถี่ และเมื่อได้รับแรงดัน 6Vac จากหม้อแปลงแล้วก็จะทำการลดระดับแรงดันลงเหลือ 3Vac ด้วยวงจรแบ่งแรงดันก่อนจะส่งต่อไปยังวงจรกันชนเพื่อแยกสัญญาณทางด้านเอาต์พุตและด้านอินพุตออกจากกันไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวน และจะส่งต่อไปยังวงจรเปรียบเทียบซึ่งสัญญาณจะถูกแปลงจากสัญญาณ Sine Wave เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม และเมื่อสัญญาณผ่านไดโอดจะได้สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมทางครึ่งบวกเพียงด้านเดียว และทำการลดระดับแรงดันให้เหมาะสมก่อนนำสัญญาณความถี่ที่ได้จากระบบและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปเปรียบเทียบยังไมโครคอนโทรลเลอร์ และจะนำความถี่ทั้งสองนี้เข้าไปยังลอจิกเกตแบบ XOR เพื่อเปรียบเทียบมุมต่างเฟส โดยสัญญาณเอาต์พุตของลอจิกเกต XOR จะเป็น '1' ตามช่วงเวลาเฟสไม่ตรงกัน โดยนำสัญญาณจากลอจิกเกต XOR นี้ ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อนำไปประมวลผลในการสั่งให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานเข้าระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 6 สัญญาณจากวงจรเปรียบเทียบมุมเฟสและความถี่

ผลการทดสอบ

การทดสอบจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ การทดสอบการทำงานของวงจรตรวจจับสัญญาณต่างๆ ที่ส่งเข้าตัวควบคุมและการทดสอบต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบ

1) การทดสอบการทำงานของวงจรตรวจจับสัญญาณ

สัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบมุมเฟสและความถี่ แสดงได้ดังรูปที่ 6 สัญญาณ 1 เป็นสัญญาณแรงดันของระบบ สัญญาณ 2 เป็นสัญญาณที่วัดได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ขณะสั่งให้ Magnetic ต่อขานาน สัญญาณ 3 เป็นสัญญาณที่แปลงจากแรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เป็นรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยมเพื่อใช้วัดความถี่ สัญญาณ 4 เป็นสัญญาณที่แปลงจากแรงดันระบบให้เป็นรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยมเพื่อใช้วัดความถี่ สัญญาณ 5 เป็นสัญญาณมุมเฟสจากลอจิกเกต XOR อธิบายได้ว่าสัญญาณที่จะไปสั่งให้ Magnetic ทำงานเพื่อขานานเข้าระบบ จะกระทำที่มุมต่างเฟสมีความแตกต่างกันตามที่กำหนด และในตำแหน่งที่สัญญาณฮับพุตอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ ซึ่งเป็นไปตามที่ออกแบบ

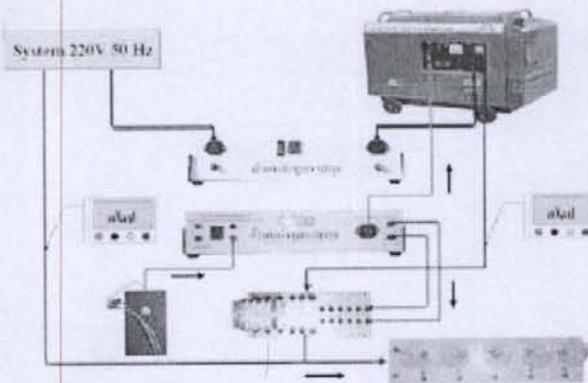
2) การทดสอบต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบ

เพื่อดูพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซลได้ทำการทดลองจ่ายโหลดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยทำการทดลองตั้งแต่ขณะไม่มีโหลด จนกระทั่งโหลดเต็มพิกัด ซึ่งผลจากการทดลองเพิ่มโหลดปรากฏว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล มีความถี่และแรงดันไฟฟ้าลดลงแปรผกผันกับโหลดที่เพิ่มขึ้น พฤติกรรมการจ่ายพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซลหลังการขานานเข้ากับระบบได้ทำการขานานเข้ากับระบบของการไฟฟ้า ซึ่งผลจากการทดลองปรากฏว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจ่ายพลังงานเข้าระบบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงที่ 70% ที่พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล และผลจากการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมการขานานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบ ดังรูปที่ 9 จะแสดงให้เห็นสัญญาณของระบบและเครื่องกำเนิดไฟฟ้างัดก่อนการขานานเข้าระบบจนกระทั่งมีการขานาน

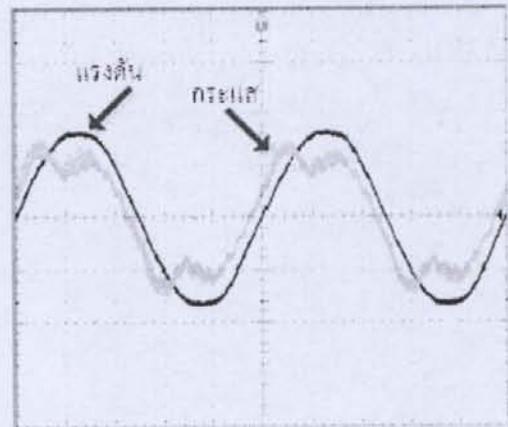
สรุป

ระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซลขานานเข้าระบบไฟฟ้าทำงานได้ตามที่ออกแบบถึงแม้ว่าสัญญาณแรงดันจะมีฮาร์โมนิกส์ปนอยู่ด้วย กล่าวคือระบบควบคุมสามารถสั่งการให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานเมื่อแหล่งจ่ายหลักไม่สามารถจ่ายโหลดได้ตามต้องการ และระบบตรวจสอบเงื่อนไขการขานานเข้าระบบทำงานได้

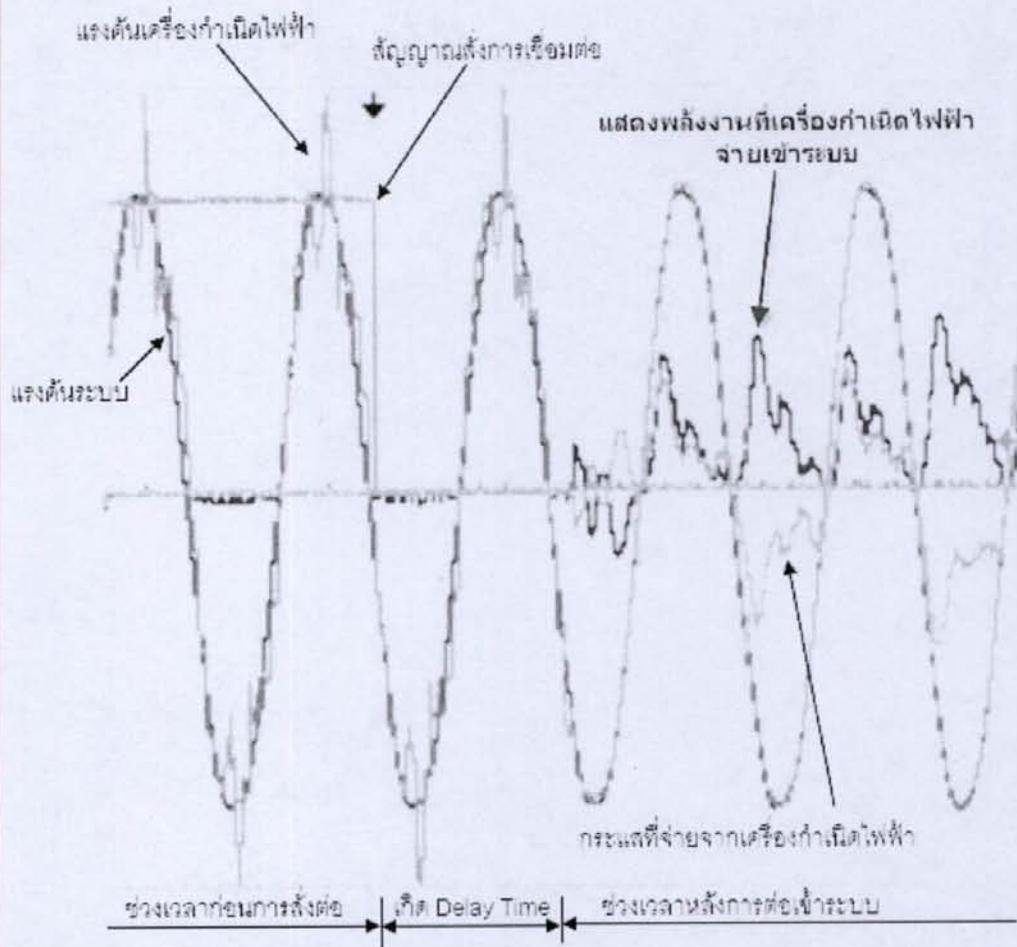
อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งสั่งงานให้หยุดการทำงานเมื่อแหล่งจ่ายหลักสามารถจ่ายโหลดได้ และเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซลทำงานขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าความถี่และแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกควบคุมโดยความถี่และแรงดันของระบบการไฟฟ้า แต่กระแสนังมีสัญญาณฮาร์มอนิกส์ปนอยู่ ซึ่งในการพัฒนาการวิจัยขั้นต่อไปจะต้องออกแบบชุดกำจัดสัญญาณฮาร์มอนิกส์ เพื่อไม่ให้ส่งผลต่อคุณภาพระบบไฟฟ้า



รูปที่ 7 ภาพรวมของระบบควบคุม



รูปที่ 8 แรงดันและกระแสเมื่อต่อเข้าระบบ

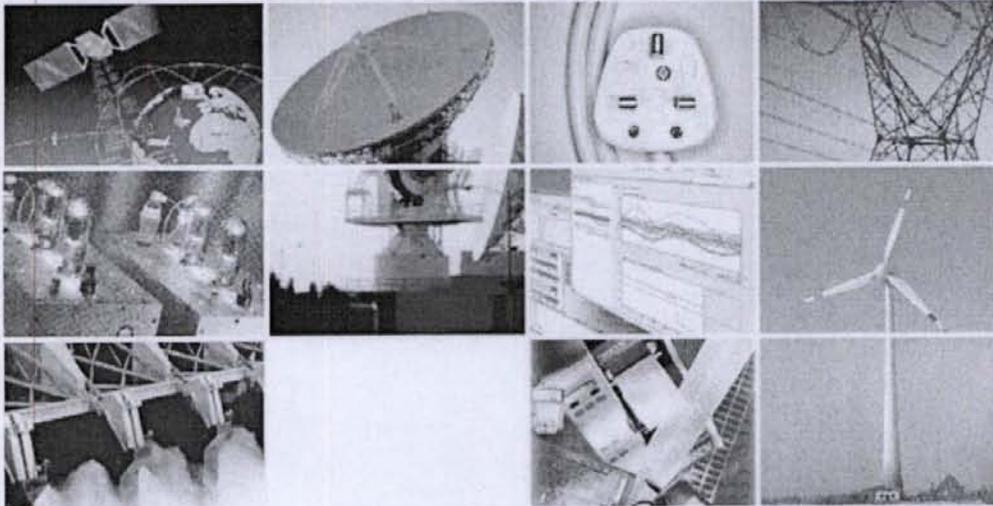


รูปที่ 9 จังหวะการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบ

ค.2 การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31)



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31
EECON-31
The 31st International Engineering Conference (EECON-31)



ร่วมจัดโดย



มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
SRINAKHARINWIROT UNIVERSITY



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

สนับสนุนโดย



Western Digital



CAT

NECTEC



ABB

รูปที่ ค.2-1 หน้าปกของการประชุม

การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำโดยคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของเฟสและนิวทรัล Analysis of Power Loss in Low Voltage Distribution System by Calculation Power Flow in Phase and Neutral

สมชาย เมียนสุณิน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 ม.1 ถนนรังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

โทร. 0-2549-3429 โทรสาร 0-2549-3422 E-mail: bsumochai@rynhoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำโดยแยกคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของสายเฟสและสายนิวทรัล เนื่องจากการใช้ไฟฟ้าในจุดจุดของระบบจำหน่ายแรงดันเป็นแบบไม่สมดุล การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าต้องใช้แบบ 3 เฟส ทำให้ขนาดสมการของข้อมูลใหญ่ ในบทความนี้จะใช้วิธีการแยกการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแต่ละเฟสและสร้างแบบจำลองโหลดที่ 3 เฟสในแต่ละบัสสำหรับคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายนิวทรัล โดยทดสอบกับระบบ 4 บัส และระบบจริงขนาด 20 บัส ผลการทดสอบใช้เป็นการวางสำหรับตัดสินใจปรับระบบให้โหลดสมดุล

คำสำคัญ ระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ, กำลังไฟฟ้าสูญเสีย

Abstract

This paper presented the analysis of power loss in low voltage distribution system by separated calculation power flow in phase and neutral. Because of load in low voltage distribution system is unbalance load, a general power flow algorithm used three-phase power flow that have big size of equation. Method of this paper is separately calculation per phase and build 3 phase load model to calculate power loss in neutral line. Test systems are 4 bus and real-life 20 bus systems. The result can be use to changing system for balance load.

Keywords: Low Voltage Distribution System, Power Loss

1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าถูกส่งไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า โดยผ่านระบบส่ง (Transmission System) และระบบจำหน่าย (Distribution System) การส่งผ่านกำลังไฟฟ้านี้ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Losses) ซึ่งกำลังไฟฟ้าสูญเสียก็จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างและค่าปรับตั้งค่าของระบบ ในระบบส่งไฟฟ้าที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยกว่าหนึ่งองศาความถี่ของการกำลังไฟฟ้าสูงซึ่งและผู้ใช้ไฟฟ้าอยู่กระจัดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า[1] สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียหลัก 2 ส่วน คือส่วนแรกเกิดจากการใช้โหลดโดยตรง

ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่สายเฟส และส่วนที่สองเกิดจากการจัดโหลดที่ไม่สมดุลทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายนิวทรัล ซึ่งระบบการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้ารายย่อย เช่นบ้านพักอาศัย จะเป็นการใช้ไฟฟ้าแบบ 1 เฟส ทำให้การรวมการใช้กำลังไฟฟ้าในแต่ละระบบจำหน่ายเป็นแบบไม่สมดุล ส่งผลทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่สายนิวทรัลเพิ่มขึ้น การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่มีโหลดไม่สมดุล มีการนำเสนอในหลายรูปแบบ อันได้แก่ การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมจากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สาย[2] โดยวิธีการดังกล่าวจะเขียนสมการโครงสร้างของระบบที่มีค่าสายนิวทรัลรวมอยู่ด้วย มีสมการสายส่งขนาด 5x5 และการตรวจจะให้ข้อมูลของสายนิวทรัลรวมเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของสายเฟส[3] มีสมการสายส่งขนาด 3x3 ทำให้โครงสร้างการคำนวณเล็กลง นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอเกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียอันเนื่องมาจากโหลดที่ไม่สมดุล [4] โดยอ้างของปริบ โหลดให้มีค่าแตกต่างกันหลายรูปแบบเพื่อวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูญเสียกับอัตราความไม่สมดุลของโหลดในแต่ละบัส

สำหรับในบทความนี้จะนำเสนอรูปแบบการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ 3 เฟส 4 สาย ซึ่งเป็นระบบจำหน่ายที่ใช้ทั่วไปในประเทศไทย โดยใช้วิธีแยกคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากสายเฟสที่ 3 เฟส และสร้างแบบจำลองโหลดที่ 3 เฟสในแต่ละบัส สำหรับคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายนิวทรัล แล้วใช้รูปแบบการคำนวณจากการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย การทดสอบใช้ระบบ 4 บัส สำหรับเปรียบเทียบการคำนวณตามทฤษฎีวงจรไฟฟ้า และระบบจริงขนาด 20 บัส ใช้ทดสอบตามเงื่อนไขการวิเคราะห์ต่างๆ

2. สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

2.1 สมการความสมดุลของกำลังไฟฟ้า

ในระบบไฟฟ้ารวมของกำลังไฟฟ้าที่มีละมิกนค่ากันศูนย์ เขียนเป็นสมการความสมดุลของกำลังไฟฟ้าโดยแยกเป็นกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้วแอกทิฟได้ดังนี้

PW-48

$$P_i = P_{Si} - P_{Li} \quad (1)$$

$$Q_i = Q_{Si} - Q_{Li} \quad (2)$$

$$P_i + jQ_i = V_i \times I_i \quad (3)$$

P_i, Q_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลจากบัส ;
 P_{Si}, Q_{Si} คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของแหล่งจ่ายที่บัส ;
 P_{Li}, Q_{Li} คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดที่บัส ;
 V_i, I_i คือ แรงดันและกระแสที่บัส ;

2.2 สมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง

สมการสมรรถนะของระบบไฟฟ้าเป็นสมการที่สร้างขึ้นมา ข้อมูลโครงสร้างของระบบ [5] โดยการนำเอาสมการโหนดจำนวน n สมการตามขนาดของระบบที่มี n บัส ไม่รวมบัสอ้างอิง มาเขียนในรูปแบบของเมทริกซ์ มีลักษณะดังสมการที่ 4

$$[S_{BUS}] = [Y_{BUS}] [V_{BUS}] \quad (4)$$

เมื่อ S_{BUS} คือ เวกเตอร์ของกำลังไฟฟ้าที่โหนดเข้าสู่อุปกรณ์
 V_{BUS} คือ เวกเตอร์ของแรงดันบัส
 Y_{BUS} คือ เมทริกซ์แอดมิตแทนซ์

2.3 วิธีการนิวตัน-แรฟสัน (Newton Raphson)

การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่มีตัวคูณหลายวิธี ในบทความนี้ใช้ นิวตัน-แรฟสัน ซึ่งใช้หลักการหาความแตกต่างของ P และ Q ที่คำนวณจากค่าแรงดันที่สมมุติขึ้นเทียบกับ P และ Q ที่เป็นจริง ถ้าความแตกต่างระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่มีค่าน้อยแสดงว่าแรงดันเข้าใกล้ค่าที่ควรจะเป็นมากขึ้น โดยหาค่า $\Delta P, \Delta Q$ ไปคำนวณหาค่าแรงดันในรอบต่อไปโดยใช้การหาค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันสมการที่ 5

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (5)$$

เมื่อ $\Delta P_i = P_{sch} - P_{calc}$
 $\Delta Q_i = Q_{sch} - Q_{calc}$

ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยวิธีการนิวตัน-แรฟสันมีดังนี้

- 1. กำหนดค่าเริ่มต้นค่าต่างๆของระบบ
- 2. คำนวณความต่างของกำลังไฟฟ้า
- 3. ตรวจสอบการเข้าสู่โดยดูที่ค่าความต่างของกำลังไฟฟ้า
- 4. สร้างเมทริกซ์ของอนุพันธ์อันดับสอง ตามสมการที่ 5
- 5. คำนวณหาค่าปรับแต่งตามสมการที่ 5
- 6. ปรับตั้งค่าขนาดและมุมของแรงดัน
- 7. เปรียบเทียบจำนวนรอบ กลับไปทำขั้นตอนที่ 2

2.4 สมการกำลังสูญเสีย

กำลังสูญเสียในแต่ละสายส่งมีค่าเท่ากับกระแสยกกำลังสอง คูณกับความต้านทานที่สายส่ง หรืออาจเขียนสมการกำลังสูญเสียจากการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระดับสายส่ง ตามสมการที่ 6

$$P_L = \sum_{n=1}^N (P_{ij} + P_{ji}) \quad (6)$$

เมื่อ P_{ij} คือกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส i ไปบัส j
 P_{ji} คือกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส j ไปบัส i

3. หลักวิธีการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของสายนิวโทรล

วิธีการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของสายนิวโทรล ใช้การรวมโหนดทั้ง 3 เฟส ให้เป็นจุดเดียวกัน โดยกำหนดให้มุมค่าเฟสของโหนดห่างกัน 120 องศา สำหรับทุกๆ บัส ซึ่งจะได้สมการสมรรถนะของโหนดในแต่ละบัส ดังนี้

$$P_N + jQ_N = \left(\frac{P_{mN} - jQ_{mN}}{1 \angle 0^\circ} \right) + \left(\frac{P_{jN} - jQ_{jN}}{1 \angle 120^\circ} \right) + \left(\frac{P_{iN} - jQ_{iN}}{1 \angle 240^\circ} \right) \quad (7)$$

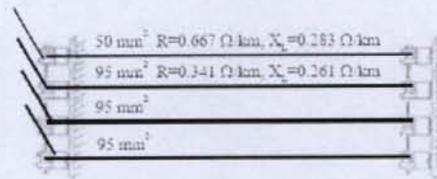
4. ระบบทดสอบ

วัตถุประสงค์ของวิธีการที่นำเสนอจะใช้สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ ซึ่งพฤติกรรมของระบบมีการใช้กำลังไฟฟ้าแบบไม่สมดุล และระบบสายจำหน่ายแรงดันต่ำจะอ้างอิงรูปแบบการติดตั้งจริงของการไฟฟ้าตามรูปที่ 1 นั่นคือขนาดสายเฟส 95 มม² ส่วนสายนิวโทรลมีขนาด 50 มม² รายละเอียดระบบทดสอบมีดังนี้

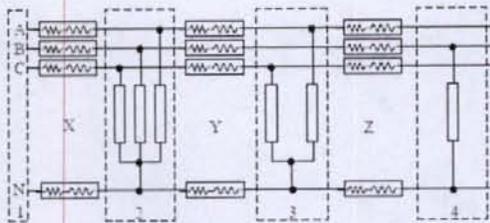
LV-4 เป็นระบบทดสอบขนาด 4 บัส ที่จะใช้สำหรับทดสอบวิธีการที่นำเสนอเกี่ยวกับกรคำนวณความสูญเสียจริงไฟฟ้า ที่มีค่าความต้องการ โฟที่รวม 25.67 kVA และแรงดันฟีดมีค่า 220 V ดังแสดงตามรูปที่ 2 ข้อมูลสายส่งตามตารางที่ 1 และข้อมูลโหนดตามตารางที่ 2

LV-20 ระบบทดสอบขนาด 20 บัส ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบจริงสำหรับหมู่บ้านจัดสรรในประเทศไทย มีค่าความต้องการไฟฟ้ารวม 91.25 kVA และแรงดันฟีดมีค่า 220 V ดังแสดงตามรูปที่ 3 ข้อมูลสายส่งตามตารางที่ 3 และข้อมูลโหนดตามตารางที่ 4

กำหนดฐานของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1 kW ฐานแรงดันเท่ากับ 220 V และคำนวณฐานอินทิเกรตจะได้เท่ากับ 48.4 Ω



รูปที่ 1 ตัวอย่างการติดตั้งระบบสายจำหน่ายแรงดันต่ำ



ก) วงจร 3 เฟส 4 สาย ของระบบทดสอบ 4 บัส



ข) วงจรเส้นเดียวของระบบทดสอบ 4 บัส
รูปที่ 2 ระบบทดสอบ 4 บัส (ต่อ)

ตารางที่ 1 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 4 บัส

ลำดับ	จุดส่ง	จุดรับ	สายเฟส (โอห์ม)		สายนิวทรัล (โอห์ม)	
			R	X	R	X
1	1	2	0.0060	0.0046	0.0117	0.0050
2	2	3	0.0064	0.0049	0.0126	0.0053
3	3	4	0.0056	0.0043	0.0109	0.0046

ตารางที่ 2 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 4 บัส

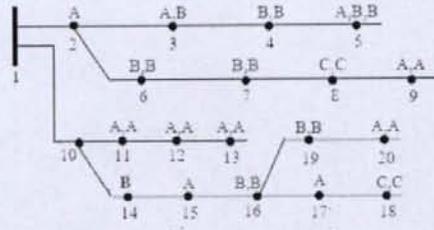
จุด	โหลดเฟส A (kW)		โหลดเฟส B (kW)		โหลดเฟส C (kW)	
	Pa	Qa	Pb	Qb	Pc	Qc
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	7.500	3.122	5.500	1.152	1.800	1.000
3	2.500	1.475	0.000	0.000	2.700	1.845
4	0.000	0.000	4.300	1.043	0.000	0.000

ตารางที่ 3 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 20 บัส

ลำดับ	จุดส่ง	จุดรับ	สายเฟส (โอห์ม)		สายนิวทรัล (โอห์ม)	
			R	X	R	X
1	1	2	0.0060	0.0046	0.0117	0.0050
2	2	3	0.0064	0.0049	0.0126	0.0053
3	3	4	0.0056	0.0043	0.0109	0.0046
4	4	5	0.0056	0.0043	0.0109	0.0046
5	2	6	0.0246	0.0158	0.0484	0.0305
6	6	7	0.0056	0.0043	0.0109	0.0046
7	7	8	0.0056	0.0043	0.0109	0.0046
8	8	9	0.0056	0.0043	0.0109	0.0046
9	1	10	0.0075	0.0057	0.0147	0.0062
10	10	11	0.0064	0.0049	0.0126	0.0053
11	11	12	0.0032	0.0025	0.0063	0.0027
12	12	13	0.0111	0.0085	0.0217	0.0092
13	11	14	0.0111	0.0085	0.0217	0.0092
14	14	15	0.0056	0.0043	0.0109	0.0046
15	15	16	0.0027	0.0021	0.0063	0.0023
16	16	17	0.0111	0.0085	0.0217	0.0092
17	17	18	0.0111	0.0085	0.0217	0.0092
18	16	19	0.0111	0.0085	0.0217	0.0092
19	19	20	0.0111	0.0085	0.0217	0.0092

5. ผลการทดสอบ

การทดสอบจะกำหนดให้แรงดันโวลต์ 3 เฟส สมมูลกัน นั่นคือ การวัดทางสายจำหน่ายแรงดันค่าส่งผลคือค่าความเหนี่ยวนำในสายน้อยมาก [6] สำหรับการทดสอบควมวิธีที่นำเสนอมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3 ระบบทดสอบ 20 บัส

ตารางที่ 4 ข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 20 บัส

จุด	โหลดเฟส A (kW)		โหลดเฟส B (kW)		โหลดเฟส C (kW)	
	Pa	Qa	Pb	Qb	Pc	Qc
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	4.514	1.484	0.000	0.000	0.000	0.000
3	6.417	2.109	2.097	0.639	0.000	0.000
4	0.000	0.000	6.667	2.192	0.000	0.000
5	1.882	0.619	2.366	0.737	0.000	0.000
6	0.000	0.000	7.514	2.469	0.000	0.000
7	0.000	0.000	5.330	2.042	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.000	4.594	1.532
9	4.258	1.409	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	4.738	1.557	0.000	0.000	0.000	0.000
12	4.215	1.672	0.000	0.000	0.000	0.000
13	7.055	1.991	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.000	0.000	2.368	0.778	0.000	0.000
15	1.125	0.370	0.000	0.000	0.000	0.000
16	0.000	0.000	6.041	1.935	0.000	0.000
17	0.000	0.000	1.125	0.370	0.000	0.000
18	0.000	0.000	0.000	0.000	4.584	1.497
19	0.000	0.000	4.643	1.532	0.000	0.000
20	4.625	1.563	0.000	0.000	0.000	0.000

1. ค่าความกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยพิจารณาเฉพาะ โหลดเฟส A
2. ค่าความกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยพิจารณาเฉพาะ โหลดเฟส B
3. ค่าความกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยพิจารณาเฉพาะ โหลดเฟส C
4. ค่าความโหลดรวมตามสมการที่ 7
5. ค่าความกำลังไฟฟ้าสูญเสีย โดยพิจารณาจากโหลดตามข้อ 4
6. รวมค่าส่งไปไฟฟ้าสูญเสียที่ได้จากข้อ 1, 2, 3, และ 5

5.1 การทดสอบกับระบบ 4 บัส

การทดสอบจะใช้การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากสมการ 7.2 เทียบกับค่าส่งไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่นำเสนอ ดังนั้นจะต้องคำนวณหาค่ากระแสในแต่ละส่วนที่ใหญ่กว่าสายจำหน่าย ซึ่งได้ค่ากระแสตามตารางที่ 5 และค่ากำลังไฟฟ้าตามตารางที่ 6 ส่วนผลการคำนวณควมวิธีที่เสนอแสดงได้ตามตารางที่ 7

ตารางที่ 5 กระแสที่ไหลผ่านสายจำหน่ายในแต่ละส่วน

สายส่ง	กระแสไฟฟ้า(A)			
	A	B	C	N
X	50.1	45.7	21.7	18.1
Y	13.2	20.1	13.2	2.2
Z	0.0	20.1	0.0	20.1

ตารางที่ 6 ค่าส่งไฟฟ้าสูญเสียในสายจำหน่ายจากการคำนวณ

สายส่ง	สาย	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย(W)			
		A	B	C	N
สายส่ง 1	X	15.1	12.5	2.8	3.8
	Y	1.1	2.6	1.1	0.1
	Z	0.0	2.3	0.0	4.4
รวมเฉลี่ย		16.2	17.4	3.9	8.3
รวมทั้งหมด		45.8			

ตารางที่ 7 ค่าส่งไฟฟ้าสูญเสียความถี่ที่เกิน

สายส่ง	สาย	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย(W)			
		A	B	C	N
รวมเฉลี่ย		16.2	17.4	3.9	8.4
รวมทั้งหมด		45.9			

ค่ากำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดจะมีค่าใกล้เคียงกัน นั่นแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบที่มีขนาดใหญ่อีกและซับซ้อนขึ้นได้ ในขณะที่การคำนวณตามหลักการไฟฟ้าทั่วไป

5.2 การทดสอบกับระบบ 20 บัส

การทดสอบกับระบบ 20 บัส จะเป็นการทดสอบเพื่อการวิเคราะห์ตามกรณีต่างๆ แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไว้ก่อน กับกรณีอื่นโดยการทดสอบดังนี้

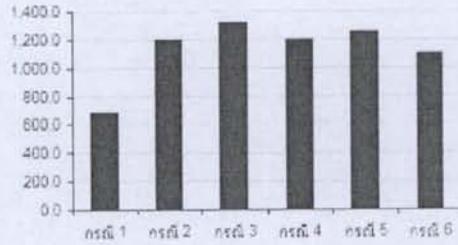
- กรณีที่ 1 จำนวนกำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉพาะสายส่ง (จำนวน 3 ครั้ง)
- กรณีที่ 2 จำนวนตามวิธีการที่นำเสนอ (จำนวน 4 ครั้ง)
- กรณีที่ 3 เลือกเปลี่ยนเฟสของโหลดที่บัส 9 จาก A,A เป็น A,B (แบ่งครึ่งโหลดที่บัส 9 ไปอยู่ที่เฟส A และเฟส B) แล้วคำนวณเหมือนกรณีที่ 2
- กรณีที่ 4 เลือกเปลี่ยนเฟสของโหลดที่บัส 9 จาก A,A เป็น A,C (แบ่งครึ่งโหลดที่บัส 9 ไปอยู่ที่เฟส A และเฟส C) แล้วคำนวณเหมือนกรณีที่ 2
- กรณีที่ 5 เลือกเปลี่ยนเฟสของโหลดที่บัส 20 จาก A,A เป็น A,B (แบ่งครึ่งโหลดที่บัส 20 ไปอยู่ที่เฟส A และเฟส B) แล้วคำนวณเหมือนกรณีที่ 2
- กรณีที่ 6 เลือกเปลี่ยนเฟสของโหลดที่บัส 20 จาก A,A เป็น A,C (แบ่งครึ่งโหลดที่บัส 20 ไปอยู่ที่เฟส A และเฟส C) แล้วคำนวณเหมือนกรณีที่ 2

การคำนวณเฉพาะกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่สายส่งตามกรณีที่ 1 มีค่าน้อยกว่ากรณีที่ 2 เกือบเท่าตัว ดังนั้นคงไม่อาจจะการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายจำหน่ายได้ เมื่อเทียบผลของกรณีที่ 3-6 กับกรณีที่ 2 พบว่า การเปลี่ยนเฟสของโหลดที่ไม่เหมาะสมจะทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้น เช่นกรณีที่ 3-5 ส่วนกรณีที่ 6 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนเฟสของโหลดทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงได้ ส่วนบัสใด

ตารางที่ 8 ค่าส่งไฟฟ้าสูญเสียกรณีทดสอบต่างๆ ของระบบ 20 บัส

กรณี	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย(W)		
	สายส่ง	สายจำหน่าย	รวม
กรณี 1	889.9	0.0	889.9
กรณี 2	689.9	504.8	1,194.7
กรณี 3	722.9	595.4	1,318.3
กรณี 4	691.8	505.2	1,197.0
กรณี 5	704.5	551.1	1,255.6
กรณี 6	663.2	432.7	1,095.9

Power Loss (W)



รูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียของกรณีทดสอบ

หรือเฟสใดที่เหมาะสมที่สุดกับการเปลี่ยนถ่ายโหลด จะต้องศึกษาหารูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการวิจัยขั้นต่อไป

6. สรุปผล

การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ โดยคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าแยกกันระหว่างแรงของเฟสแต่ละสร้างแบบจำลองโหลดทั้ง 3 เฟสในแต่ละบัส สำหรับคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายจำหน่ายเพื่อให้สามารถคำนวณได้กับปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าในขนาดกลาง โดยหลักการทดสอบดังกล่าวจะเป็นข้อเสนอการปรับเปลี่ยนเฟสที่โหลดที่อยู่ เพื่อให้การใช้กำลังไฟฟ้าของโหลด 3 เฟสมีความสมดุล สำหรับแนวทางการพัฒนาระบบวิจัยต่อไปคือการหาดัชนีชี้วัดที่จะช่วยเลือกจุดที่จะปรับเปลี่ยนโหลดให้ส่งผลต่อการลดลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Glover, J. D., and Sarma, M. S. *Power System Analysis and Design*, 3rd Edition, Australia : Brooks/Cole, 2002.
- [2] Rade M.Ciric and etc., "Power Flow in Four-Wire Distribution Network-General Approach" *IEEE Trans. On Power System*, Vol.18, No.4, November 2003.
- [3] Jen-Hao Teng, "A Network-Topology-based Three-Phase Load Flow for Distribution Systems" *Proc. Natl. Sci. Council, ROC(TAI)*, Vol.24, No.4, 2000.
- [4] Luis F.Ochoa and etc., "Evaluation of Distribution System Losses Due to Load Unbalance" *IS'PSCC, Liege, 22-26 August 2005*.
- [5] M.A.PAI, *Computer Techniques in Power System Analysis*, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 1979.
- [6] Poole Vanient Santos Valois and etc., "Voltage Unbalance in Low voltage Distribution Networks" *CIGRE2001*, 18-21 June 2001.



นายสนชาย เบียนสุตเนน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าจากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2539 สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2548 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำที่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี