วิศวกรรมสาร ม.ข. ปีที่ 31 ฉบับที่ 2 (175-189) เมษายน-มิถุนายน 2547
KKU Engineering Journal Vol. 31 No. 2 (175-189) April-June 2004

การประมาณค่าสูญเสียแกนเหล็กหม้อแปลง 3 เฟสเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นสัญญาณซายน์

สิริวิช ทัดสวน[1] ธวัชชัย ธรรมประสิทธิ์[1] ชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล[2] และ เฉลิมชาติ มานพ[3]
[1] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเทคโนโลยีธนบุรี
[2] ภาควิชาไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
[3] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นงานวิจัย การประมาณหาค่าสูญเสียของแกนเหล็กหม้อแปลง 3 เฟส ชนิดคอร์แบบ 3 ขาและ 5 ขา เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่เป็นสัญญาณซายน์ ขั้นตอนการสร้างและทดสอบ โดยใช้แผ่นเหล็กประเภทเรียงแนวรีดเบอร์ M5(0.3 มม) ออกแบบสร้างแกนเหล็กหม้อแปลง 3 เฟสชนิด คอร์แบบ 3 ขาและ 5 ขา ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบนำไปเปรียบเทียบกับการคำนวณ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการทำนายค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็กและการออกแบบหม้อแปลงแบบ 3 เฟส ได้อย่างเหมาะสมกับสภาพของแหล่งจ่ายที่ไม่เป็นรูปคลื่นซายน์

คำสำคัญ : กำลังสูญเสียแกนเหล็ก แรงดันไม่เป็นสัญญาณซายน์ หม้อแปลง 3 เฟส แผ่นเหล็กเรียงแนวรีด

Estimation of Core Loss of 3 phase Transformer When Non-Sinusoidal Voltage Supply

Siriwich Tadsuan[1] Thawatchai Thammaprasit[1] Chanwit Tangsiriworakul[2] and Chalermchat Manop[3]

[1] Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi College of Technology
[2] Department of Electrical, College of Industrial Technology, King mongkut's Institute of Technology- North Bangkok
[3] Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This paper presents the core loss estimation of 3-phase transformer of 3-Limbed Core Type and 5-Limbed Core Type when non-sinusoidal voltage is energized. Grain oriented magnetic steel side M5 (0.3mm), 3 phase 6 steps Inverter and the low pass filter are used in estimation of core loss. The results are compared with measured research and are useful for prediction of core load and design of the appropriate 3 phase transformer when non-sinusoidal voltage is energized.

Keywords : Core loss, Non-sinusoidal voltage, 3 phase Transformer, Grain oriented magnetic steel

บทนำ

ในปัจจุบันแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์เช่น หม้อแปลง มอเตอร์ เครื่องทำเนิดไฟฟ้าและอื่นๆ อาจไม่เป็นสัญญาณซายน์อันเนื่องมาจากระบบไฟฟ้ามีฮาร์โมนิกมาร่วมด้วย ซึ่งจะส่งผลกับเครื่องมือและอุปกรณ์ ที่ต่อร่วมกันในวงจรข่ายเดียวกัน และยังส่งผลเสียกับเสถียรภาพของระบบอีกด้วย อุปกรณ์ที่ต้องต่อกับระบบไฟฟ้าชนิดหนึ่งก็คือหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งโดยส่วนมากแล้วหม้อแปลงจำหน่ายจะมีโอกาสเผชิญกับระบบที่มีแรงดันผิดเพี้ยนจากสัญญาณซายน์มากกว่าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ดังนั้น การศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกที่มีผลต่อหม้อแปลงจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก ในงานวิจัยนี้มีขอบเขตจำกัดเฉพาะในเรื่องของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กเพียงอย่างเดียว ส่วนในเรื่องการสูญเสียที่ขดลวดอันเนื่องจากกระแสฮาร์โมนิกนั้นได้มีงานวิจัยแล้ว[4] ซึ่งเป็นการศึกษาเรื่องอุณหภูมิของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันและการลดลงของอายุฉนวนอันเนื่องจากความร้อน ดังนั้น เมื่อมีการรวมงานวิจัยนี้กับ[สิริวิช ทัดสวน. 2542] จะ

ทำให้การศึกษาในเรื่องของอุณหภูมิของหม้อแปลงและอายุของฉนวนอันเนื่องจากความร้อนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ทฤษฎี

ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แผ่นเหล็กของหม้อแปลงขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างคลื่นของค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ซึ่งค่า B ขึ้นอยู่กับค่าของแรงดันไฟฟ้า โดยจะไม่พิจารณาค่าความต้านทานของขดลวดและค่ารีแอคแตนซ์รั่วซึ่งมีปริมาณน้อย ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แผ่นเหล็กประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ

การสูญเสียจากฮีสเตอรีซีส

จาก Alexander Eigeles Emanuel และ Xiaoming Wang, 1985 เมื่อคลื่นของแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ จะได้

$$V_{\omega t} = \sum \sqrt{2} V_{n(rms)} \sin\left(n\omega t + \phi_n\right) \tag{1}$$

เมื่อ $V_{\omega t}$ คือ แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ มีหน่วยเป็นโวลท์, $V_{n(rms)}$ คือ ค่าแรงดันประสิทธิผลที่ค่าลำดับฮาร์โมนิกใดๆ มีหน่วยเป็นโวลท์, ω คือ ความถี่เชิงมุม radian/sec, n คือ ลำดับฮาร์โมนิก t คือเวลา, มีหน่วยเป็นวินาที และ ϕ_n คือ มุมเฟสของฮาร์โมนิกที่ n

สำหรับขนาดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

$$B_{\max} = \frac{\pi}{2NA\omega}\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} V_{\omega t} d(\omega t) = \frac{\pi}{2NA\omega} V_{avg} = \frac{1}{NA\omega} V_{\max} \tag{2}$$

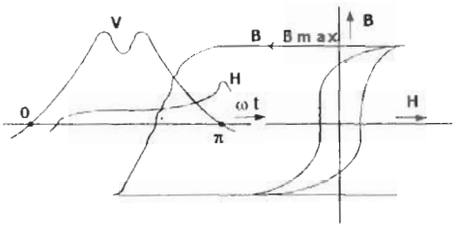
เมื่อ π คือค่าคงที่ มีค่า 3.14, B_{max} คือ ความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก, Weber/m^2, V_{avg} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย, มีหน่วยเป็นโวลท์ V_{max} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด, มีหน่วยเป็นโวลท์ N คือ จำนวนรอบของตัวนำ และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก มีหน่วยเป็น m^2

โดยที่

$$V_{(ave)} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sum \frac{V_{n(rms)}}{n} \cos\phi_n \tag{3}$$

สำหรับคลื่นแรงดันที่ตัดผ่านเส้นแรงดันศูนย์มีครั้งเดียวของทุกๆ ไซเคิลดังรูปที่ 1 ความชันของคลื่น B จะไม่เปลี่ยนเครื่องหมาย ซึ่งแสดงได้ในช่วงระหว่าง $0 < \omega t < \pi$ การ

คำนวณจะใช้ Steinmetz's formula ดังสมการที่ (4)



รูปที่1 ฮีสเตอรีซิสลูป ซึ่งสอดคล้องกับแรงดันไม่เป็นซายน์, ค่า B และค่า H

$$P_H = k_H f B_{\max}^{\sigma} = k_H f \left[\frac{\pi}{2NA\omega} V_{avg} \right]^{\sigma} \tag{4}$$

เมื่อ P_H คือ ค่าสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอรีซิส, W, k_H คือ ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็กที่ทำการทดลอง และ σ คือ ค่า Steinmetz's มีค่าระหว่าง 1.0 -3.0 โดยทั่วไปกำหนด = 1.6 เมื่อ

$$K_H = k_H \left(\frac{\pi}{2NA\omega} \right)^{\sigma} \tag{5}$$

จะได้

$$P_H = K_H f \left(V_{avg} \right)^{\sigma} \tag{6}$$

เมื่อพิจารณาแรงดันประสิทธิผลที่แผ่นป้ายที่คลื่นมูลฐาน แทนสมการที่ (3) ลงในสมการที่ (6) และแทนค่า $\phi_1 = 0$ จะได้ ค่าสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอรีซิสดังสมการที่ (7)

$$P_{HN} = K_H f \left(\frac{2\sqrt{2} V_{rms}}{\pi} \right)^{\sigma} \tag{7}$$

เมื่อ P_{HN} คือ ค่าสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอรีซิสที่แรงดันแผ่นป้ายชื่อที่คลื่นมูลฐาน, มีหน่วยเป็นวัตต์ และ V_{rms} คือ ค่าแรงดันประสิทธิผลที่แรงดันที่แผ่นป้ายชื่อ มีหน่วยเป็นโวลท์

ดังนั้น สามารถหาค่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียของแกนแหล็ก เมื่อพิจารณาแรงดันฮาร์โมนิกร่วมด้วย ดังสมการที่ (8)

$$P_H = P_{HN} \left(\sum \frac{1}{n} \frac{V_{n(rms)}}{V_{rms}} \cos\phi_n \right)^{\sigma} \tag{8}$$

การสูญเสียจากกระแสไหลวน

จาก Alexander Eigeles Emanuel และ Xiaoming Wang, 1985 ค่าสูญเสียจากกระแสไหลวนของแผ่นเหล็กบาง เมื่อเกิดสัญญาณฮาร์โมนิกร่วมด้วย ดังสมการที่ (8)

$$P_{ecn} = K_e n^2 f^2 B_{n(\max)}^2 C_{en} \tag{9}$$

เมื่อ P_{ecn} คือ ค่าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน มีหน่วยเป็นวัตต์ $B_{n(\max)}$ คือ ความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็กที่ลำดับฮาร์โมนิกใดๆ, มีหน่วยเป็น Weber/m^2, K_e คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะ และความหนาของแผ่นเหล็ก และ C_{en} คือ ค่าฟังก์ชันที่ปรับค่า และ

$$C_{en} = 1 - 0.0017\xi^{3.61}, \quad \xi < 3.6 \tag{10}$$

$$C_{en} = \frac{3}{\xi}, \quad \xi > 3.6 \tag{11}$$

โดยที่

$$\xi = \Lambda\sqrt{\pi\mu\gamma nf} \tag{12}$$

และ

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \tag{13}$$

เมื่อ Δ คือค่าความหนาของแผ่นเหล็ก มีหน่วยเป็น m, μ คือค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น H/m, γ คือค่าความนำจำเพาะของแกนเหล็ก มีหน่วยเป็น mho-m, ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของแกนเหล็ก มีหน่วยเป็น $\Omega - m$

ที่ความถี่คลื่นมูลฐาน n.f = 50 Hz ค่า $C_{e1} \approx 1$ จากสมการที่ (9) สามารถปรับเป็นสมการที่ (14)

$$P_{ecN} = K_e f^2 B_{\max}^2 \tag{14}$$

เมื่อ C_{e1} คือ ค่าฟังก์ชันที่ปรับค่า ที่คลื่นมูลฐาน $(n = 1)$ และ P_{ecN} คือ ค่าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่แรงดันที่แผ่นป้ายชื่อ มีหน่วยเป็น W และ

$$B_{n(\max)} = \frac{\phi_{n(\max)}}{A} = \frac{V_{n(\max)}}{\omega nAN} = \frac{\sqrt{2}V_{n(\max)}}{\omega nAN} \tag{15}$$

ดังนั้น จากสมการที่ (9) ปรับเป็นสมการที่ (16)

$$P_{ecn} = K_e \frac{n^2}{n^2} f^2 \left(\frac{\sqrt{2} V_{n(\max)} B_{\max}}{\omega A N B_{\max}} \right)^2 C_{en} \tag{16}$$

และ

$$P_{ecn} = K_e B_{\max}^2 f^2 \left(\frac{V_{n(\max)}}{V_{\max}} \right)^2 C_{en} \tag{17}$$

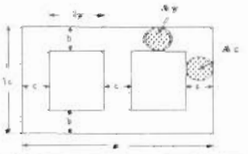
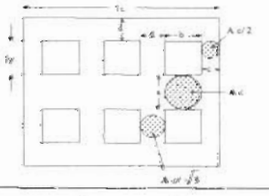
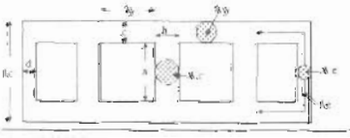
$$P_{ec} = \sum P_{ecn} = \sum K_e B_{\max}^2 f^2 \left(\frac{V_{n(\max)}}{V_{\max}} \right)^2 C_{en} \tag{18}$$

$$P_{ec} = K_e B_{\max}^2 f^2 \left(\frac{V_{1(\max)}}{V_{\max}} \right)^2 C_{e1} + \sum_{n \neq 1} K_e B_{\max}^2 f^2 \left(\frac{V_{n(\max)}}{V_{\max}} \right)^2 C_{en} \tag{19}$$

เมื่อ $n = 1$ จะได้ $C_{e1} \approx 1$ (จากการทดสอบในงานวิจัยนี้) ดังนั้น

$$P_{ec} = P_{ecn} \left(\frac{V_{1(rms)}}{V_{rms}} \right)^2 \left[1 + \sum_{n \neq 1} \left(\frac{V_{n(rms)}}{V_{1(rms)}} \right)^2 C_{en} \right] \tag{20}$$

ตารางที่ 1 ค่า C_{Tn} สำหรับลำดับศูนย์

Type of Transformer	Geometry $\lambda_y = l_y / l_c$ $\alpha_y = A_y / A_c$ $\lambda_e = l_e / l_c$ $\alpha_e = A_e / A_c$	$C_{Tn} =$
3 limb ed Core-Type		$1/\left(1 + 1.33\lambda_y / \alpha_y\right)$
Shell-Type		$\frac{1 + 4.46\lambda_y}{1 + 2.15\lambda_y}$
5 limb ed Core-Type		$\frac{1 + 0.33\lambda_y / \alpha_y + 1.5\lambda_e / \alpha_e}{1 + 1.33\lambda_y / \alpha_y}$

เมื่อ C_{Tn} เป็นค่าตัวประกอบที่ปรับแก้ไข เมื่อเป็นหม้อแปลง 3 เฟส สำหรับลำดับบวกและลำดับลบ $C_{Tn}=1$ และสำหรับฮาร์โมนิกลำดับศูนย์ เช่น 3, 9, 15.... สำหรับลำดับศูนย์ C_{Tn} ขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของหม้อแปลง แสดงดังตารางที่ 1 ดังนั้น

$$P_{ec}=P_{ecN}\left(\frac{V_{1(rms)}}{V_{rms}}\right)^2\left[1+\sum_{n\neq1}\left(\frac{V_{n(rms)}}{V_{1(rms)}}\right)^2 C_{en}C_{Tn}\right] \tag{21}$$

และ

$$P_{core}=P_{ec}+P_H \tag{22}$$

P_{core} คือ ค่าสูญเสียของแกนเหล็ก โดยพิจารณาค่าสูญเสียอันเนื่องจากฮาร์โมนิกร่วมด้วย, W

การคำนวณหาค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ (23)

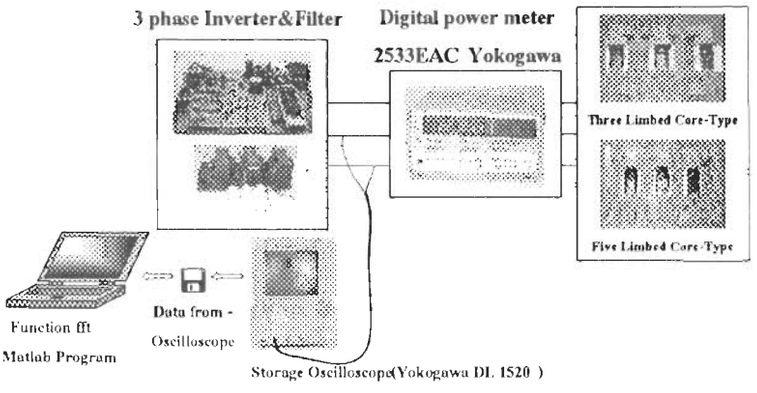
$$\%THD_V=\frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty}V_n^2}}{V_1}\times100 \tag{23}$$

$\%THD_V$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันไฟฟ้า

ขั้นตอนและผลการทดสอบ

การทดสอบได้ออกแบบสร้างแกนเหล็กหม้อแปลง 3 เฟสแบบ 3 limb core type, 5 limb core type ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 2, 3 และแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟสฟิลเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2 ส่วนรูปคลื่นตัวอย่างของสัญญาณแรงดันแสดงดังรูปที่ 3 ถึง 7

ผลการทดสอบโดยใช้เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้ายี่ห้อ Yokogawa รุ่น 2533EAC เปรียบเทียบกับการคำนวณ โดยใช้ storage oscilloscope ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DL1520 จับสัญญาณแรงดัน จากนั้นใช้ฟังก์ชัน fft ของโปรแกรม Matlab หาขนาดและมุมเฟสของฮาร์โมนิกของแรงดันที่วัดได้จาก oscilloscope ค่ากำลังสูญเสียของแกนเหล็ก ดังตารางที่ 4 และรูปที่ 8 ส่วนผลการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบและคำนวณรวมทั้งค่าผิดพลาด แสดงดังรูปที่ 9 ถึง 18



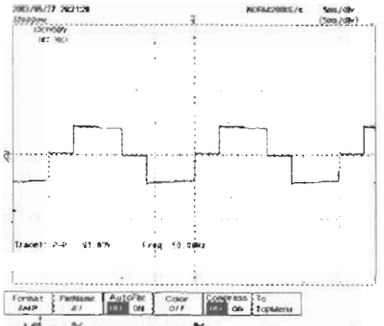
รูปที่ 2 ชุดแกนเหล็กชนิดต่าง ๆและแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

ตารางที่ 2 ข้อมูลจำเพาะของแกนเหล็กและขดลวดเมื่อทำการออกแบบ 3 limb core type

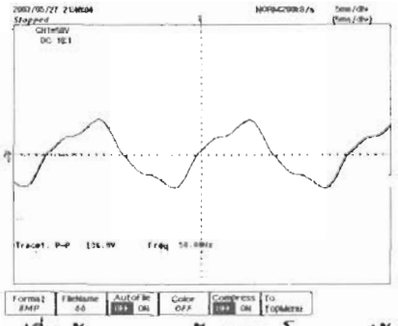
ที่Vrms(sin)แผ่นป้ายชื่อ = 33 Vphase	μ = 0.0375 H/m ที่Vrms(sin) = 33 Vphase	กำลังสูญเสียแกนเหล็กจากการทดสอบ ที่Vms(sin)50 Hz = 5.9 w	
B_{max} = 1.5 Tesla ที่Vrms(sin) = 33 Vphase	Δ = 0.3 mm (M5)	กำลังสูญเสียแกนเหล็กจากการทดสอบ ที่Vms(sin) 35 Hz = 3.25 w	
H_{max} = 40 A.t/m ที่Vrms(sin) = 33 Vphase	ρ = 47 $\mu\Omega$–c.m [3]	P_{HN} 1.71 W	P_{ecN} = 4.19 W
Coil = 150 turn/phase ต่อแบบ Delta		น้ำหนักแกนเหล็กทั้งหมด = 6.18 kg	
ly = 12	lc = 24	Ay = 6.6	Ac = 6.6

ตารางที่ 3 ข้อมูลจำเพาะของแกนเหล็กและขดลวดเมื่อทำการออกแบบ 5 limb core type

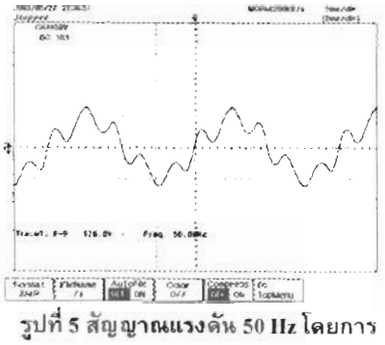
ที่Vrms(sin)แผ่นป้ายชื่อ = 33 Vphase	μ = 0.0375 H/m ที่Vrms(sin) = 33 Vphase		กำลังสูญเสียแกนเหล็กจากการทดสอบ ที่Vms(sin)50 Hz 5.4 w		
B_{max} = 1.5 Tesla ที่Vrms(sin) = 33 Vphase	Δ = 0.3 mm (M5)		กำลังสูญเสียแกนเหล็กจากการทดสอบ ที่ Vms(sin) 35 Hz 3.0 w		
H_{max} = 40 A.t/m ที่Vrms(sin) = 33 Vphase	ρ = 47 $\mu\Omega$-cm [3]		P_{HN} = 1.686 W	P_{ecN} = 3.714 W	
Coil = 150 turn/phase ต่อแบบ Delta			น้ำหนักแกนเหล็กทั้งหมด = 6.44 kg		
lc = 34	ly = 8	lc = 22	Ac = 3.3	Ay = 4.95	Ac = 6.6



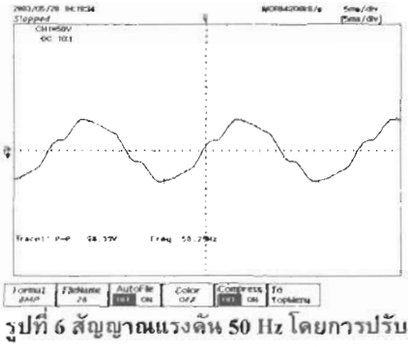
รูปที่ 3 สัญญาณแรงดัน quasi square 50 Hz โดยการปรับค่า $V_{1(rms)}$=33 V $\%THD_V$=30% ซึ่งได้กำลังสูญเสียดังลำดับที่ 6 ของตารางที่ 4



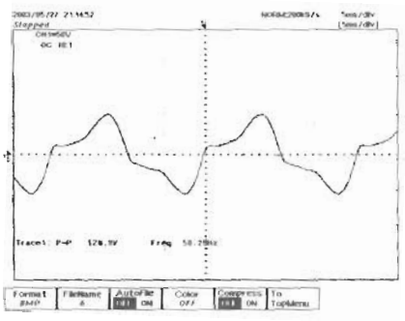
รูปที่ 4 สัญญาณแรงดัน 50 Hz โดยการปรับค่า $V_{1(rms)}$ 33 V $\%THD_V$ = 17.2% ซึ่งได้กำลังสูญเสียดังลำดับที่ 1 ของตารางที่ 4



รูปที่ 5 สัญญาณแรงดัน 50 Hz โดยการปรับค่า $V_{1(rms)}$=33 V $\%THD_V$ = 36.7% ซึ่งได้กำลังสูญเสียดังลำดับที่ 11 ของตารางที่ 4



รูปที่ 6 สัญญาณแรงดัน 50 Hz โดยการปรับค่า $V_{1(rms)}$ 33 V $\%THD_V$ = 9.8% ซึ่งได้กำลังสูญเสียดังลำดับที่ 16 ของตารางที่ 4



รูปที่ 7 สัญญาณแรงดัน 50 Hz โดยการปรับค่า $V_{1(rms)}$ 35.2 V $\%THD_V = 25.6\%$ ที่ $B = 1.6$

ตารางที่ 4 ค่ากำลังสูญเสียจากการคำนวณและทดสอบของแกนเหล็กแบบ Three และ 5 limbed core type เมื่อเป็นสัญญาณแรงดันต่าง ๆ

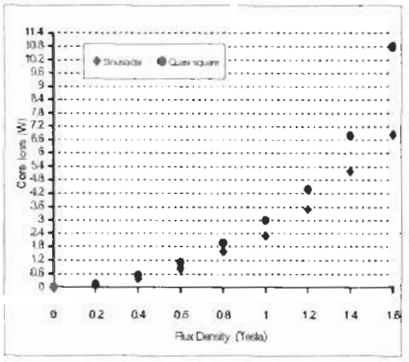
ลำดับที่	$\%THD_V$	Ph	Pec	Pe_c	Pe_t	Abe	%Re
1.รูป 9 ที่ rated volt แบบ3 limb	17.2	1.731	4.32	6.051	7.06	-1.009	-14.29
2.รูป 9 ลด 5% แบบ3limb	15.7	1.532	3.766	5.298	5.64	-0.342	-6.06
3.รูป 9 ลด10% แบบ3limb	14.7	1.397	3.369	4.766	4.74	0.026	~0.00
4.รูป 9 ลด15% แบบ3limb	13.9	1.27	2.987	4.257	4.04	0.217	5.37
5.รูป 9 ลด 20% แบบ3limb	13.2	1.172	2.687	3.859	3.55	0.309	8.7
6.รูป 10 ที่ rated volt แบบ 3limb	30	1.84	4.47	6.31	8.02	-1.71	-21.32
7.รูป 10 ลด 5% แบบ 3limb	30	1.71	4.051	5.76	7.05	-1.29	-18.30
8.รูป 10 ลด 10% แบบ 3limb	30	1.562	3.636	5.198	5.94	-0.742	-12.49
9.รูป 10 ลด 15% แบบ 3limb	30	1.406	3.19	4.6	4.97	-0.37	-7.44
10.รูป 10 ลด 20% แบบ 3limb	30	1.30	2.854	4.154	4.25	-0.096	-2.26
11.รูป 11 ที่ rated volt แบบ 3limb	36.7	1.884	4.762	6.646	10.3	-3.654	-35.48
12.รูป 11 ลด 5% แบบ 3 limb	33.2	1.72	4.167	5.887	8.13	-2.243	-27.59
13.รูป 11 ลด 10% แบบ 3 limb	30	1.59	5.32	5.32	6.75	-1.43	-21.19
14.รูป11ลด15%แบบ3limb	28.5	1.42	4.657	4.657	5.60	-0.943	-16.84
15.รูป11ลด20%แบบ3limb	27.3	1.30	4.21	4.21	4.86	-0.65	-13.37
16.รูป12ที่ratedvoltแบบ5limb	9.8	1.7	3.749	5.449	6.12	-0.671	-10.96

ตารางที่ 4 (ต่อเนื่อง)

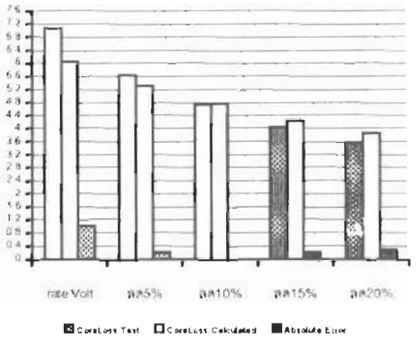
ลำดับที่	%THD_V	Ph	Pec	Pc_c	Pc_t	Abe	%Re
17.รูป 12 ลด 5% แบบ 5limb	9.3	1.56	3.33	4.890	5.10	-0.21	-0.002
18.รูป 12 ลด 10% แบบ 5limb	9.0	1.432	3.0	4.43	4.38	0.05	1.14
19.รูป 12 ลด 15% แบบ 5limb	8.8	1.302	2.669	3.971	3.77	0.201	5.33
20.รูป 12 ลด 20% แบบ 5limb	8.5	1.18	2.36	3.54	3.28	0.26	7.92
21.รูป 13 ที่ rated volt 5limb	28.4	1.817	3.969	5.786	6.28	-0.494	-7.87
22.รูป13 ลด 5% แบบ 5limb	28.4	1.679	3.558	5.237	5.45	-0.213	-3.91
23.รูป13 ลด 10% แบบ 5limb	28.4	1.5	3.098	4.598	4.6	0.002	0.00
24.รูป13 ลด 15% แบบ 5limb	28.4	1.4	2.843	4.243	4.04	0.203	5.02
25.รูป13 ลด 20% แบบ 5limb	28.4	1.274	2.51	3.784	3.51	0.274	7.80
26.รูป14 ที่ rated volt แบบ 5limb	42.8	1.93	4.48	6.41	8.0	-1.59	-19.87
27.รูป14 ลด 5% แบบ 5limb	38.0	1.772	4.392	6.164	6.2	-0.036	-0.00
28.รูป14 ลด 10% แบบ 5limb	36.6	1.623	3.457	5.08	5.33	-0.25	-4.69
29.รูป14 ลด 15% แบบ 5limb	35.6	1.466	3.04	4.506	4.5	0.006	0.00
30.รูป14 ลด 20% แบบ 5limb	34.8	1.33	2.69	4.02	3.88	0.14	3.61

หมายเหตุ Pc_t = Core loss Test , Pc_c = Core loss Calculated, Abe(Absolute error)=Pc_c-Pc_t ,

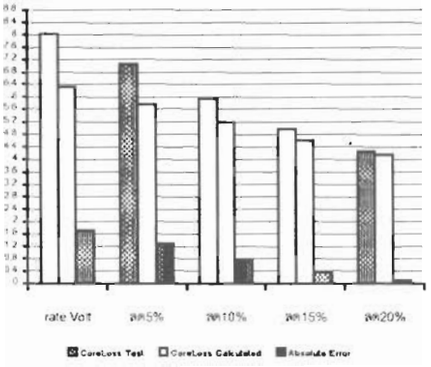
% Re (Relative error) = $\frac{Pc_c - Pc_t}{Pc_t} \times 100$



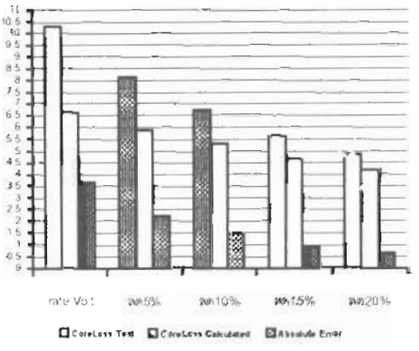
รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก เมื่อสัญญาณแรงดันคลื่นซายน์เทียบกับสัญญาณ quasi square โดยทดสอบกับแกนเหล็กแบบ 3 limb core type



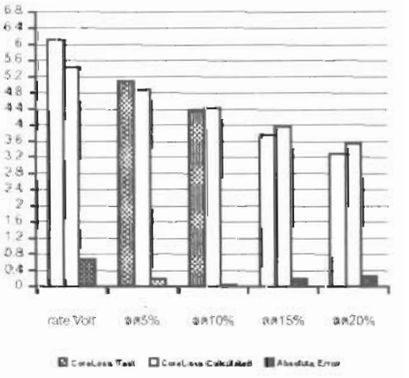
รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก จากค่าที่วัดได้กับค่าจากการคำนวณ ข้อมูลจากตารางที่ 4 ลำดับที่ 1-5 (หน่วยเป็น Watt)



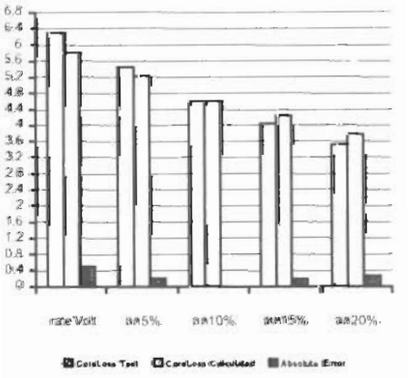
รูปที่10 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก จากค่าที่วัดได้กับค่าจากการคำนวณ ข้อมูลจากตารางที่4 ลำดับที่6-10 (หน่วยเป็น Watt)



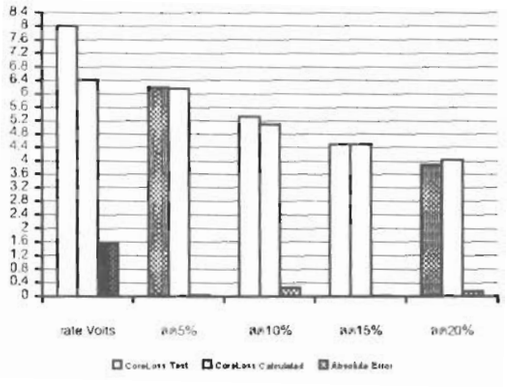
รูปที่11 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก จากค่าที่วัดได้กับค่าจากการคำนวณ ข้อมูลจากตารางที่4 ลำดับที่11-15 (หน่วยเป็น Watt)



รูปที่12 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก จากค่าที่วัดได้กับค่าจากการคำนวณ ข้อมูลจากตารางที่ 4 ลำดับที่16-20 (หน่วยเป็น Watt)



รูปที่13 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก จากค่าที่วัดได้กับค่าจากการคำนวณ ข้อมูลจากตารางที่ 4 ลำดับที่21-25 (หน่วยเป็น Watt)



รูปที่14 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก จากค่าที่วัดได้กับค่าจากการคำนวณ ข้อมูลจากตารางที่ 4 ลำดับที่ 26-30 (หน่วยเป็น Watt)

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 เมื่อพิจารณารูปที่ 8 เป็นการทดสอบกับแกนเหล็กแบบ 3 limb core type เห็นได้ชัดว่าค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็กเนื่องจากสัญญาณกึ่งสี่เหลี่ยมมีค่ามากกว่ากำลังสูญเสียเมื่อเป็นสัญญาณซายน์และแกนเหล็กแบบ 5 limb core type ก็มีลักษณะเช่นเดียวแบบ 3 limb core type

4.2 เมื่อพิจารณารูปที่ 9 เป็นกรณีของการออกแบบแกนเหล็กแบบ 3 limb core type ซึ่งเป็นกรณีลำดับที่ 1 ของตารางที่ 4 เมื่อออกแบบให้ $B = 1.5$ Tesla (ที่แรงดันพิกัด 33 V, $\%THD_V = 17.2\%$) ค่า %Re จะมีค่าสูงถึง –14.29% แสดงว่าโมเดลทางคณิตศาสตร์นี้มีค่าผิดพลาดเมื่อเทียบกับการทดสอบพอสมควร แต่ถ้าเป็นกรณีลำดับที่ 2-5 แรงดันป้อนเข้าลดต่ำลงกว่าแรงดันที่พิกัด (5% ถึง 20%) นั่นหมายถึงค่า B ก็ลดต่ำลงกว่า 1.5 ลงมา โมเดลนี้จะให้ค่าผิดพลาดน้อย

4.3 เมื่อพิจารณารูปที่ 10 เป็นกรณีของการออกแบบแกนเหล็ก 3 limb core type เมื่อสัญญาณเป็นแบบกึ่งสี่เหลี่ยม $\%THD_V = 30\%$ ค่า %Re มีค่า -2.26% ถึง -21.32% แสดงว่าโมเดลทางคณิตศาสตร์นี้จะจำกัด $\%THD_V$ ที่มีค่าไม่สูงเกิน ยกเว้นที่ค่า B ต่ำๆ (เช่นที่ ลด 20% ค่า %Re มีค่า -2.26%) เมื่อพิจารณารูปที่ 11 เมื่อเพิ่ม $\%THD_V$ สูงขึ้นเป็น (27.3 ถึง 36.7%) เห็นได้ว่า %Re มีค่าผิดพลาดสูงขึ้น

4.4 เมื่อพิจารณารูปที่ 12 เป็นกรณีของการออกแบบแกนเหล็กแบบ 5 limb core type กรณีลำดับที่ 16 ของตารางที่ 4 เมื่อออกแบบให้ $B = 1.5$ Tesla (ที่แรงดันพิกัด 33 V, $\%THD_V = 9.8\%$) ค่า %Re จะมีค่า −10.96% แสดงว่าโมเดลทางคณิตศาสตร์นี้มีค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ แต่ถ้าระดับแรงดันป้อนเข้าลดต่ำลงกว่าแรงดันที่พิกัด (5% ถึง 20%) นั่นหมายถึงค่า B ก็ลดต่ำลงกว่า 1.5 Tesla โมเดลนี้จะให้ค่าผิดพลาดน้อย

4.5 เมื่อพิจารณารูปที่ 13 เป็นกรณีของการออกแบบแกนเหล็ก 5 limb core type เมื่อสัญญาณเป็นแบบกึ่งสี่เหลี่ยม $\%THD_V = 28.4\%$ ค่า %Re มีค่า 0 ถึง −7.87% แสดงว่าโมเดลทางคณิตศาสตร์นี้ ที่ $\%THD_V$ นี้ โมเดลนี้จะให้ค่าผิดพลาดน้อย ซึ่งแตกต่างกับรูปที่ 10

4.6 เมื่อพิจารณารูปที่ 14 เป็นกรณีของการออกแบบแกนเหล็ก 5 limb core type กรณีลำดับที่ 26 เมื่อออกแบบให้ $B = 1.5$ Tesla (ที่แรงดันพิกัด 33 V, $\%THD_V = -19.87\%$) ค่า %Re มีค่าผิดพลาดสูง แต่ถ้าลด B ลง (แรงดันลดลง 5% ถึง 15%) โมเดลนี้จะให้ค่าผิดพลาดน้อย

สรุปและข้อเสนอแนะ

1. ในกรณีที่เป็น 3 limb core type โมเดลทางคณิตศาสตร์จะให้ค่าใกล้เคียงกับการทดสอบเมื่อออกแบบให้B ต่ำกว่า 1.5 เช่นที่ $B = 1.42$ Tesla
2. ในกรณีที่เป็น 3 limb core type เมื่อค่า $\%THD_V$ สูงขึ้น ทำให้ค่า %Re มีค่าสูง ดังนั้น โมเดลทางคณิตศาสตร์ไม่ควรนำไปใช้ได้กับกรณีที่ $\%THD_V$ สูงๆ
3. ในกรณีที่เป็น 5 limb core type โมเดลทางคณิตศาสตร์ยอมรับได้ (%Re = 10.96) แต่ถ้าลดค่า B จาก 1.5 ลงมาเหลือ 1.42 ค่า %Re จะมีค่าน้อย ดังนั้น จึงสามารถนำโมเดลทางคณิตศาสตร์ไปใช้งานได้
4. จากผลการทดสอบที่ $\%THD_V$ สูงๆ เห็นได้ว่าโมเดลทางคณิตศาสตร์ของการแบบ 5 limb core type สามารถคำนวณได้ใกล้เคียงกว่าแบบ 3 limb core type
5. ค่าแปอร์เซ็นต์กำลังสูญเสียที่แกนเหล็กแบบ 5 limb core type จะมีค่าน้อยกว่าแบบ 3 limb core type เมื่อ $\%THD_V$ ใกล้เคียงกันเช่น เมื่อออกแบบเป็นแบบ 3 limb ที่แผ่นป้ายชื่อค่า $P_{ecR} = 5.9$ W และผลจากตารางที่4 ลำดับที่7 ที่ $\%THD_V = 30\%$ ค่า $P_{ec} = 7.05$ W เพิ่มขึ้น 19.5%

แต่เมื่อออกแบบ 5 limb ที่แผ่นป้ายชื่อค่า P_{ecN} = 5.4 W และจากตารางที่ 4 ลำดับที่ 21 ที่ $\%THD_I$ = 28.4% ค่า P_{ec} = 6.28 W เพิ่มขึ้น 16.3% ดังนั้น การออกแบบหม้อแปลงที่มีฮาร์โมนิกร่วมด้วยนั้น การออกแบบ 5 limb core type จะช่วยลดกำลังสูญเสียที่แกนเหล็กได้ดีกว่าแบบ 3 limb core type

จากสภาพความเป็นจริงโดยทั่วๆ ไปแล้ว โอกาสที่สัญญาณแรงดันของระบบไฟฟ้าจะผิดเพี้ยนจากสัญญาณซายน์ไม่มากนัก ดังนั้น โมเดลทางคณิตศาสตร์จึงยอมรับได้ ซึ่งจะทำให้เป็นประโยชน์ในการพำนายค่ากำลังสูญเสียของแกนเหล็ก เมื่อแรงดันของระบบไฟฟ้ามีฮาร์โมนิกร่วมด้วยได้เป็นอย่างดี

จากการทำวิจัยครั้งนี้ ได้ออกแบบโครงสร้างของแกนเหล็กแบบ 3 limb core type และ 5 limb core type เพียงอย่างละ 1 ตัวอย่างเทานั้น ดังนั้น เพื่อให้ได้ข้อสรุปของผลลัพธ์จากการทดลองที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น สมควรที่จะมีการปรับพารามิเตอร์ของโครงสร้างแกนเหล็กหม้อแปลงที่ค่าต่างๆ กัน รวมทั้งปรับเปลี่ยนขนาดความหนาของแกนเหล็ก ซึ่งสิ่งต่างๆ เหล่านี้จะมีประโยชน์มากเกี่ยวกับเรื่องเศรษฐศาสตร์ของหม้อแปลงอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ วิทยาลัยเทคโนโลยีธนบุรี ที่ได้สนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Alexander Eigeles Emanuel, Xiaoming Wang. 1985. "Estimatation stimation of life of power trnsformer supplying nonlinear loads" **IEEE Trans. On Power Apparatus and System**. 104, 3: 628-636.

P.C. Sen. 1997. **Principles of electric machines and power lectronics**. Second Ed. Singapore: John Wiley & Sons.

Donald g. Fink, H. Beaty. 1993. **Standard handbook for electrical engineering**. Singapore : McGraw-Hill.

สิริวิช ทัดสวน. 2542 การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันที่ภาระเป็นเชิงเส้นและภาระไม่เป็นเชิงเส้น **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง