

การทดสอบและทำนายอุณหภูมิมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อใช้แหล่งจ่าย พีดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์

สิริวิษ ทัดสวน¹ และ สุรัตน์ ตีรอด²

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ หนองแขม กรุงเทพฯ 10160

รับเมื่อ 28 พฤษภาคม 2550 ตอบรับเมื่อ 6 พฤศจิกายน 2551

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษากำลังไฟฟ้าสูญเสีย พฤติกรรมความร้อน การออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์และทำนายอุณหภูมิของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อใช้ พีดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์ ชนิด 3 เฟสเป็นแหล่งจ่าย เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดบรรทัดฐานในการใช้งานและในการป้องกันมอเตอร์ได้รับความเสียหายอันเนื่องจากความร้อนเกินขีดจำกัดของฉนวน โดยขั้นตอนการทดสอบใช้ พีดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์ ชนิด 3 เฟส ปรับคลื่นความถี่มูลฐานในช่วง 15-50 เฮิร์ตซ์ เลือกความถี่สวิทซ์อินเวอร์เตอร์ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ควบคุมแรงบิดมอเตอร์ที่ 5 N.m. ใช้สตอเรจออกซิลโคปเวดัลต์สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งทางออกของอินเวอร์เตอร์ใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิที่ขดลวดมอเตอร์ใช้เครื่องวัดความเร็วลมวัดความเร็วลมที่ใบพัดระบายอากาศ

ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้ทราบว่าค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าและขาออกของมอเตอร์ที่มีค่าแปรผันตามคลื่นความถี่อินเวอร์เตอร์ อุณหภูมิของมอเตอร์จะแปรผกผันกับความถี่อินเวอร์เตอร์ ผลการทำนายอุณหภูมิขดลวดมอเตอร์จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบ

ประโยชน์ที่ได้รับ ทำให้สามารถทราบแนวทางการแก้ไขโครงสร้างมอเตอร์ ปรับปรุงใบพัดระบายอากาศ และวางแผนการใช้งานมอเตอร์เมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ พีดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : พีดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์ / กำลังไฟฟ้าสูญเสีย / อุณหภูมิขดลวด / ฮาร์โมนิก / มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

Testing and Prediction of Temperature of Three-Phase Induction Motor with PWM Inverter Supply

Siriwich Tadsuan¹ and Surat Deerot²

South East Asia University, Nhongkham, Bangkok 10160

Received 28 May 2007 ; accepted 6 November 2008

Abstract

This paper presents the study of electrical power losses, the thermal behavior, the design of mathematical model and prediction of temperature of an induction motor supplied by a 3-phase PWM inverter. The purpose of this research was to determine the criterions about loading, protection of damaged motor from overheat of an Insulator. The 3-phase PWM inverter operated the fundamental frequencies varying between 15-50 Hz. While a constant switching frequency is of 15 kHz, the motor torque was maintained constant at 5 N.m . A storage oscilloscope was used to measure the voltages and currents at the output of the inverter. In addition, a thermocouple was used to measure the winding temperature and anemometer was used to measure speed of ventilating fan.

The results of tests revealed that the values of the electrical power input and power output varied according to the frequencies of inverter and the values of the winding temperature was inverse with the frequencies of inverter, the test results are shown that the winding temperature by the prediction is nearly the same that by the experiment.

The advantage of this research is that it enables modified motor structure, implementation of ventilating fan and planning for motor loading when supplied by a 3-phase PWM inverter.

Keywords : PWM Inverter / Electrical Power Loss / Winding Temperature / Harmonic / Induction Motor

¹ Assistant Professor, Department of Electrical Engineering.

² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering.

1. บทนำ

โดยปกติแล้วมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีจำหน่ายในท้องตลาดโดยทั่วๆ ไป จะออกแบบสร้างใช้งานกับแหล่งจ่ายที่เป็นคลื่นสัญญาณชานันท์ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วแหล่งจ่ายนี้จะมีฮาร์โมนิกปะปนมาบ้างแต่มีปริมาณเล็กน้อย จะไม่ส่งผลเสียหายกับตัวมอเตอร์มากนัก แต่เมื่อนำมอเตอร์นี้มาใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายประเภท พีดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์แล้ว ข้อดีคือสามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ แต่มีข้อเสียคือทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก [1-6] และขดลวด [1,3,7] มีปริมาณสูงขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้แหล่งจ่ายคลื่นสัญญาณชานันท์ และยังส่งผลไปถึงอุณหภูมิที่สูงขึ้นที่แกนเหล็กตัวสเตเตอร์ โรเตอร์และที่ขดลวดในตัวมอเตอร์อีกด้วยในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นถึงเรื่องกำลังไฟฟ้าสูญเสียและเรื่องอุณหภูมิของขดลวด เพื่อต้องการศึกษาว่าที่ความเร็วรอบของโรเตอร์ต่างๆ การระบายความร้อนโดยการพามีมากน้อยเพียงใด รวมถึงการออกแบบสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ในการทำนายอุณหภูมิขดลวดในขณะใช้งานร่วมกับ พีดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะช่วยในการป้องกันและวางแผนการใช้งานของมอเตอร์ได้เป็นอย่างดี

2. ทฤษฎี

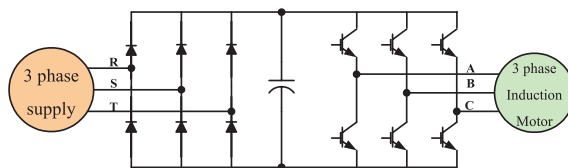
2.1 วงจรเรกติฟายเออร์และวงจรถับดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 1 ในภาคของอินเวอร์เตอร์จะใช้พีดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส มีการควบคุมแรงดันเอาท์พุทและความถี่ (V/f) โดยคงที่แรงดันดีซีเชื่อมโยง (D.C. Link) การทำงานโดยทั่วไปอยู่ในย่านดัดชันการมอดูเลชันเชิงเส้น ($m_a \leq 1.0$) ดังรูปที่ 2 โดยแรงดันสายถึงสายคลื่นมูลฐาน [1, 8] ดังสมการต่อไปนี้

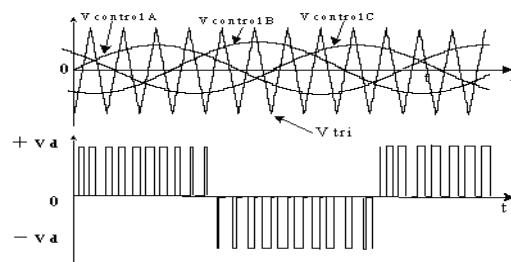
$$V_{LL1} = 0.612m_a \cdot V_{dc} \quad (1)$$

$$m_a = \frac{V_{\text{peak of Sinusoidal wave}}}{V_{\text{peak of Triangle wave}}} \quad (2)$$

V_{LL1} คือแรงดันอาร์เอ็มเอสคลื่นมูลฐานสายถึงสาย, V_{dc} คือแรงดัน ดี. ซี. เชื่อมโยง, V_{m_a} คือดัดชันการมอดูเลชันทางขนาด



รูปที่ 1 เรกติฟายเออร์แบบ 3 เฟส และวงจรถับดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2 การมอดูเลชันด้วยสัญญาณชานันท์อ้างอิง 3 เฟส และคลื่นแรงดันขาออกแบบ 3 เฟส

สมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องสมการที่ 3 ถึง สมการที่ 17 [9-10] แสดงได้ดังนี้

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (3)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (4)$$

$$P_{(h)} = V_h \cdot I_h \cdot \cos \phi_h \quad (5)$$

หรือ

$$P_{(h)} = V_{r(h)} \cdot I_{r(h)} + V_{j(h)} \cdot I_{j(h)} \quad (6)$$

ดังนั้น

$$P_T = \sum_{h=1}^{\infty} P_{(h)} \quad (7)$$

$$Q_{(h)} = V_h \cdot I_h \cdot \sin \phi_h \quad (8)$$

หรือ

$$Q_{(h)} = V_{r(h)} \cdot I_{j(h)} + V_{j(h)} \cdot I_{r(h)} \quad (9)$$

ดังนั้น

$$Q_T = \sum_{h=1}^{\infty} Q_{(h)} \quad (10)$$

ดังนั้น

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} \quad (11)$$

$$DPF = \frac{P_1}{V_1 I_1} = \frac{V_1 I_1 \cos \phi}{V_1 I_1} = \cos \phi_1 \quad (12)$$

$$PF_{(h)} = \frac{P_{(h)}}{S_{(h)}} \quad (13)$$

$$PF = \frac{P}{S} \quad (14)$$

$$\% THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (15)$$

$$\% THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (16)$$

$$P_{OUT} = \frac{2\pi N_r}{60} \cdot T \quad (17)$$

$I_{j(h)}$ คือกระแสจินตภาพลำดับ h ของฮาร์โมนิก, A

P_T คือกำลังไฟฟ้าจริงรวม, W

$P_{(h)}$ คือกำลังไฟฟ้าจริงลำดับ h , W

P_{OUT} คือกำลังไฟฟ้าขาออกของมอเตอร์, W

$Q_{(h)}$ คือกำลังไฟฟ้าเสมือนลำดับ h , Var

Q_T คือกำลังไฟฟ้าเสมือนรวม, Var

$S_{(h)}$ คือกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏลำดับ h , VA

S_T คือกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏรวม, VA

T คือแรงบิดมอเตอร์, N.m

N_r คือความเร็วรอบของมอเตอร์, rpm

DPF คือตัวประกอบกำลังของคลื่นมูลฐาน

$PF_{(h)}$ คือตัวประกอบกำลังที่ลำดับ h ของฮาร์โมนิก

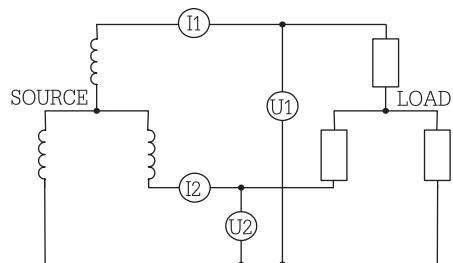
PF คือตัวประกอบกำลัง

ϕ_h คือมุมแตกต่างระหว่าง V_h กับ I_h

$\%THD_V$ คือ % ความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันไฟฟ้า

$\%THD_I$ คือ % ความผิดเพี้ยนรวมของกระแสไฟฟ้า

การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าในระบบสามเฟสสามสายโดยใช้วิธีการแบบวัตต์มิเตอร์ 2 เครื่อง ดังรูปที่ 3 มีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้ [9]



รูปที่ 3 วงจรการวัดกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีการแบบวัตต์มิเตอร์ 2 เครื่อง

$$\sum P_{3T} = P_{T1} + P_{T2} \quad (18)$$

หรือ

$$\sum P_{3T} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(v_{acn} \cdot i_{an}) + (v_{bcn} \cdot i_{bn})] \quad (19)$$

$$\sum Q_{3T} = Q_{T1} + Q_{T2} \quad (20)$$

เมื่อ

V_1 คือแรงดันอาร์เอ็มเอสคลื่นมูลฐาน, V

V_h คือแรงดันอาร์เอ็มเอสลำดับ h ของฮาร์โมนิก, V

V_{rms} คือแรงดันประสิทธิภาพ, V

$V_{r(h)}$ คือแรงดันจริงลำดับ h ของฮาร์โมนิก, V

$V_{j(h)}$ คือแรงดันจินตภาพลำดับ h ของฮาร์โมนิก, V

I_1 คือกระแสอาร์เอ็มเอสคลื่นมูลฐาน, A

I_h คือกระแสอาร์เอ็มเอสลำดับ h ของฮาร์โมนิก, A

I_{rms} คือกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ, A

$I_{r(h)}$ คือกระแสจริงลำดับ h ของฮาร์โมนิก, A

$$\sum S_{3T} = \sqrt{(\sum P_{3T})^2 + (\sum Q_{3T})^2} \quad (21)$$

$$\sum PF_3 = \frac{\sum P_{3T}}{\sum S_{3T}} \quad (22)$$

เมื่อ

P_{T1} คือกำลังไฟฟ้าจริง (จากสมการที่ 7) จากการวัดแรงดันไฟฟ้าเฟส A-C และกระแสไฟฟ้าสายของเฟส A, W

P_{T2} คือกำลังไฟฟ้าจริง (จากสมการที่ 7) จากการวัดแรงดันไฟฟ้าเฟส B-C และกระแสไฟฟ้าสายของเฟส B, W

$\sum P_{3T}$ คือกำลังไฟฟ้าจริงรวม 3 เฟส, W

$\sum Q_{3T}$ คือกำลังไฟฟ้าเสมือนรวม 3 เฟส, Var

$\sum S_{3T}$ คือกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏรวม 3 เฟส, VA

$\sum PF_3$ คือตัวประกอบกำลังเฉลี่ย 3 เฟส

V_{ac}, V_{bc} คือแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ (สายถึงสายระหว่าง A-C และ B-C ตามลำดับ), V

i_a, i_b คือกระแสไฟฟ้าชั่วขณะ(สาย), A

$n = 1, 2, \dots, N$ คือ อันดับการ Sampling

N คือ จำนวนข้อมูลในการ Sampling

2.2 การถ่ายเทความร้อนของมอเตอร์

จากการออกแบบติดตั้งใบพัดด้านท้ายมอเตอร์นั้น จุดประสงค์เพื่อใช้ถ่ายเทความร้อนแบบการพาแบบบังคับให้กับตัวมอเตอร์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (23) ถึงสมการที่ (25) ส่วนตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติที่เกี่ยวกับความร้อนของอากาศที่ความดันบรรยากาศ [11]

$$Q = \bar{h}A(T - T_c) \quad (23)$$

เมื่อ

Q คืออัตราการถ่ายเทความร้อน, W

\bar{h} คือสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนโดยเฉลี่ย, w/m^2K

A คือพื้นที่ผิว (m^2)

T คืออุณหภูมิของผนัง, K

T_c คืออุณหภูมิของของไหล, K

จาก [11] ในกรณีเป็นการเคลื่อนที่ของไหลขนานกับผนังราบที่เป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) สามารถหา \bar{h} ได้ดังสมการที่ 24

$$\bar{h} = 0.664 (Re_{cl}^{1/2})(Pr^{1/3}) \frac{K}{L} \quad (24)$$

เมื่อ

$$Re_{cl} = \frac{UL}{V} \quad (25)$$

Re_{cl} คือตัวเลขเรย์โนลด์

U คือความเร็วลม (m/s)

L คือความยาวครีป (m)

V คือความสามารถในการแพร่กระจายทางความร้อน (m^2/s)

Pr คือตัวเลขแพรนเดิล

K คือค่าการนำความร้อน (W/mK)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติที่เกี่ยวกับความร้อนของอากาศที่ความดันบรรยากาศ [11]

T (°K)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg K)	$V \times 10^5$ (m ² /s)	k (W/mK)	$\alpha \times 10^5$ (m ² /s)	$\mu \times 10^5$ (kg/ms)	Pr
250	1.413	1005	0.949	0.0223	1.32	1.60	0.722
300	1.177	1006	1.57	0.0262	2.22	1.85	0.708
350	0.998	1009	2.08	0.0300	2.98	2.08	0.697
400	0.883	1014	2.59	0.0337	3.76	2.29	0.689
450	0.783	1021	2.89	0.0371	4.22	2.48	0.683
500	0.705	1030	3.79	0.0404	5.57	2.67	0.680

2.3 อุณหภูมิมอเตอร์

จาก [12] ดังสมการที่ (26) เป็นการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มขดลวดในสภาวะคงตัวของหม้อแปลงกำลังแบบแห้ง โดยค่าอุณหภูมินี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญคือ 1. กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ (S) 2. อุณหภูมิเพิ่มขดลวดที่พิกัด ค่า S ของหม้อแปลงกำลังเกิดจาก V.I ที่สภาวะโหลดใดๆ V มีค่าเท่ากันตลอด ดังนั้นสามารถปรับให้อยู่ในรูปกระแสที่ไหลผ่านขดลวดได้ดังสมการที่ (27) และอุณหภูมิเพิ่มขดลวดที่พิกัด (θ_{Wrise_rated}) ขึ้นกับการระบายความร้อน (การนำพา การแผ่รังสี) โดยส่วนมากเป็นลักษณะของการพา ถ้าหม้อแปลงมีการระบายความร้อนแบบธรรมชาติ (Self-Air Cooling) ทำให้ค่าอุณหภูมิเพิ่มขดลวดที่พิกัดมีผลลัพธ์เพียงค่าเดียวดังสมการที่ (27) แต่ถ้าพิจารณาถึงมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำที่มีการระบายความร้อนด้วยการพาซึ่งอาศัยแรงลมจากใบพัดที่ติดตั้งอยู่ด้านท้ายมอเตอร์ เมื่อนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อินเวอร์เตอร์แบบ พีดีบีเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์ (ควบคุมการทำงานแบบ V/F มีการปรับสวิทซ์สูงๆ เลือกใช้ที่ 15 kHz ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสฮาร์โมนิกมีค่าน้อยมาก ผลลัพธ์คือกระแสประสิทธิผลใกล้เคียงกับกระแสประสิทธิผลคลื่นมูลฐานตลอดช่วงความถี่มูลฐาน) ค่าอุณหภูมิเพิ่มขดลวดที่พิกัดของมอเตอร์ (θ_{Wrise_rated}) จะมีหลายๆ ค่าขึ้นกับความถี่มูลฐานที่ทดสอบ ซึ่งค่าอุณหภูมิเพิ่มขดลวดที่พิกัดนี้จะแปรผกผันกับความถี่มูลฐานของมอเตอร์ ตามสภาพความเป็นจริงของการใช้งานมอเตอร์มีโอกาสปรับความเร็วรอบที่แตกต่างกันหลายระดับ ดังนั้นการออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้จะทำการปรับอุณหภูมิเพิ่มขดลวดที่พิกัดของสมการที่ (27) ให้เป็นอุณหภูมิเพิ่มขดลวดที่พิกัดในช่วงความถี่คลื่นมูลฐานใดๆ (θ_{Wrise_rated}) ขึ้นตอนการทดสอบโดยจำเป็นต้องวัดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดที่กระแสพิกัดในช่วงความถี่มูลฐานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งาน (ใช้เทอร์โมคัปเปิลฝังที่ขดลวดทองแดงที่อยู่ในมอเตอร์) จากนั้นใช้การคำนวณเชิงตัวเลขแบบกำลังสองน้อยสุด (Least square method) สร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ กลายเป็นอุณหภูมิเพิ่มขดลวดที่ความถี่มูลฐานใดๆ ดังสมการที่ (28)

$$\theta_{Wrise} = \left(\frac{S}{S_{rated}} \right)^{1.6} \times \theta_{Wrise_rated} \quad (26)$$

$$\theta_{Wrise} = \left(\frac{I_{rms}}{I_{rms_rated}} \right)^{1.6} \times \theta_{Wrise_rated} \quad (27)$$

$$\theta_{Wrise(fre)} = \left(\frac{I_{rms(fre)}}{I_{rms_rated}} \right)^{1.6} \times \theta_{Wrise_rated(fre)} \quad (28)$$

เมื่อ

I_{rms_rated} คือกระแสประสิทธิผลที่พิกัดมอเตอร์, A

$I_{rms(fre)}$ คือกระแสประสิทธิผลที่ความถี่ใดๆ, A

θ_{Wrise} คืออุณหภูมิเพิ่มของขดลวด, °C

θ_{Wrise_rated} คืออุณหภูมิเพิ่มของขดลวดที่พิกัด, °C

$\theta_{Wrise_rated(fre)}$ คืออุณหภูมิเพิ่มขดลวดที่พิกัดที่ความถี่มูลฐานใดๆ, °C

จากสมการที่ (28) สามารถอธิบายเป็นสมการหาค่าอุณหภูมิเพิ่มขดลวดสภาวะเริ่มต้นที่ความถี่ใดๆ และค่าอุณหภูมิเพิ่มขดลวดสภาวะช่วงท้ายที่ความถี่ใดๆ ดังสมการที่ (29) และสมการที่ (30) ตามลำดับ

$$\theta_{iWrise(fre)} = \left(\frac{I_{rms(fre)}}{I_{rms_rated}} \right)^{1.6} \times \theta_{Wrise_rated(fre)} \quad (29)$$

$$\theta_{uWrise(fre)} = \left(\frac{I_{rms(fre)}}{I_{rms_rated}} \right)^{1.6} \times \theta_{Wrise_rated(fre)} \quad (30)$$

เมื่อ

$\theta_{iWrise(fre)}$ คืออุณหภูมิเพิ่มขดลวดสภาวะเริ่มต้น, °C

$\theta_{uWrise(fre)}$ คืออุณหภูมิเพิ่มขดลวดสภาวะช่วงท้าย, °C

จาก [12] ค่าเวลาคงตัว (τ_w) ของหม้อแปลงแบบแห้งมีค่าเท่ากับ 45 นาที ส่วนหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันมีค่าเท่ากับ 7 นาที ส่วนในงานวิจัยนี้ค่า τ_w จะได้จาก การทดสอบ ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 63 ของอุณหภูมิเพิ่มขดลวดที่พิกัดกระแส โดยเริ่มต้นจากอุณหภูมิเพิ่มที่ศูนย์ [13] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 เฮิรตซ์ จากนั้นนำไปหาค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าที่นำไปใช้งาน ส่วนอุณหภูมิเพิ่มขดลวดที่เวลาใดๆ สามารถแสดงได้จาก

สมการที่ (31) ส่วนสมการที่ (32) เป็นการหาค่าอุณหภูมิ
ขดลวดซึ่งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิเพิ่มขดลวดบวกกับอุณหภูมิ
แวดล้อม

$$\theta_{t_{W \text{ rise (fre)}}} = (\theta_{u_{W \text{ rise (fre)}}} - \theta_{i_{W \text{ rise (fre)}}}) \left(1 - e^{-t/\tau_w}\right) + \theta_{i_{W \text{ rise (fre)}}} \quad (31)$$

$$\theta_{t_{W \text{ (fre)}}} = \theta_{t_{W \text{ rise (fre)}}} + \theta_a \quad (32)$$

$\theta_{t_{W \text{ rise (fre)}}}$ คืออุณหภูมิเพิ่มขดลวดที่เวลาใดๆ, °C

$\theta_{t_{W \text{ (fre)}}}$ คือค่าอุณหภูมิขดลวดที่เวลาใดๆ, °C

θ_a คืออุณหภูมิแวดล้อม, °C

3. ขั้นตอนและผลการทดสอบ

3.1 ขั้นตอนการทดสอบ

ต่อวงจรดังรูปที่ 4 และดูรูปที่ 1 ประกอบ โดยมี
เงื่อนไขในการทดสอบดังนี้

1. ปรับคลื่นความถี่พีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ที่
50 เฮิร์ตซ์ (คงที่ความถี่สวิตชิงอินเวอร์เตอร์ที่ประมาณ 15
กิโลเฮิร์ตซ์) จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรง
กระรอกมีคุณสมบัติตามตารางที่ 2

2. ควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ทดสอบให้
คงที่เท่ากับ 5.0 N.m. ตลอดการทดสอบ (ใช้ชุดทดสอบ
ทอร์คมิเตอร์ยี่ห้อ Terco รุ่น MV1040 โดยการต่อคัปปีง
แกนมอเตอร์ที่ทดสอบร่วมกับชุดทอร์คมิเตอร์และเครื่อง
กำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง การควบคุมแรงบิดกระทำโดย
การปรับภาระไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

3. วัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้วยสตอเรจ
ออสซิลอสโคปยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL1640 โดยใช้วิธี

การแบบวัดดีมิเตอร์ 2 เครื่อง วัดสัญญาณที่ตำแหน่ง Pin
ของรูปที่ 7 (ดูรูปที่ 1 ประกอบ) บันทึกรูปคลื่นแรงดัน
และกระแสด้วยแฟ้มนามสกุล .BMP และนามสกุล .CSV
(การวัดกำลังโดยใช้วิธีการแบบวัดดีมิเตอร์ 2 เครื่อง ได้
ทำการสอบเทียบกับ Power Analyzer ยี่ห้อ YOKOGAWA
รุ่น PZ4000)

4. บันทึกอุณหภูมิขดลวดด้วยเทอร์โมมิเตอร์
แบบใช้ร่วมกับเทอร์โมคัปเปิล TypeK ทุกๆ 15 นาที จน
อุณหภูมิเพิ่มขดลวดอยู่ในสภาวะคงตัว วัดและบันทึกความ
เร็วลมที่ด้านท้ายมอเตอร์ด้วยเครื่องวัดความเร็วลม จาก
นั้นหยุดการทดสอบ

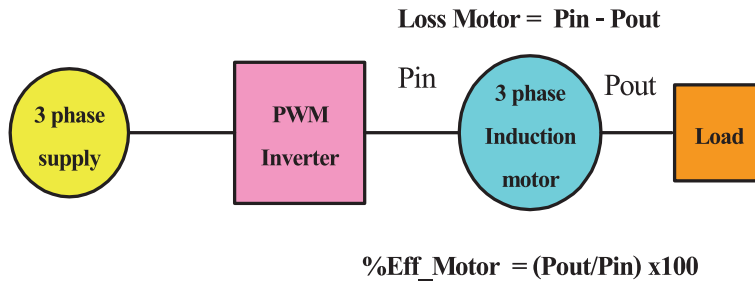
5. ทิ้งมอเตอร์ไว้ให้อุณหภูมิมอเตอร์ลดลง
เท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม

6. เปลี่ยนคลื่นความถี่ พีดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์
เตอร์ไปที่ 45, 40, 35, 30, 25, 20 และ 15 เฮิร์ตซ์ เรียง
ตามลำดับ และทำตามข้อ 2 ถึงข้อที่ 6 จนถึงความถี่ของ
พีดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์ที่ 15 เฮิร์ตซ์

7. นำแฟ้มข้อมูลนามสกุล .CSV ไปวิเคราะห์
ด้วยฟังก์ชัน FFT และคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

ตารางที่ 2 ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่นำมาทดสอบ

แรงดันที่ขั้ว = 380 V	กำลัง 1 แรงม้า (746 W)	ความเร็วโรเตอร์ที่พิกัดโหลด = 1,400 rpm
ความถี่ = 50 Hz	กระแสสายที่พิกัด = 1.98 A	ความเร็วสลิป = 1 00 rpm % สลิปที่พิกัด = 6.67
ขั้วแม่เหล็ก = 4 ขั้ว	ตัวประกอบกำลัง (PF) = 0.8	ฉนวนคลาส F (155 °C) อุณหภูมิเพิ่มคลาส B (90 °C)
ต่อขดลวดแบบ Y	ประสิทธิภาพ = 72 %	อุณหภูมิแวดล้อม -15 °C ถึง 40 °C



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุม

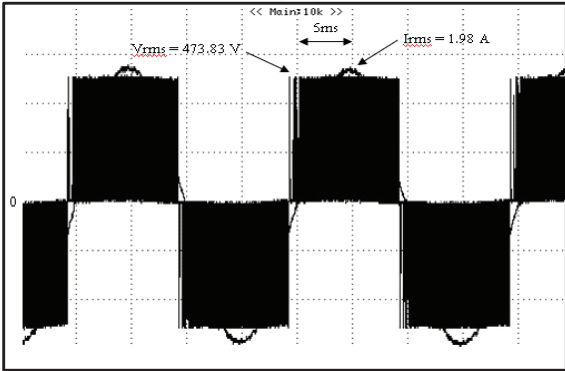
3.2 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบสามารถแสดงดังตารางที่ 3 และ

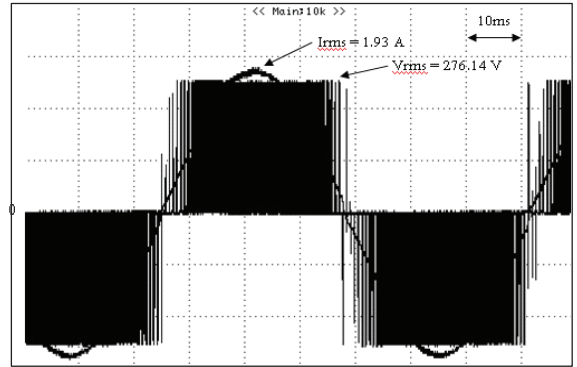
ตัวอย่างบางรูปสามารถแสดงดังรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 10

ตารางที่ 3 ข้อมูลต่างๆ ของมอเตอร์ เมื่อใช้แหล่งจ่าย พัดเบิ้ลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์

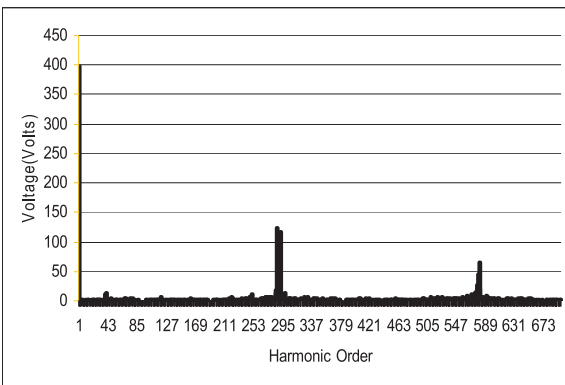
	Sine	PWM Inverter							
	50 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
$V_{rms}(A-C).. V$	383.65	276.14	313.56	344.32	374.48	399.73	421.95	446.28	473.83
$I_{rms}(A).. A$	1.973	1.935	1.914	1.932	1.936	1.948	1.945	1.948	1.985
$P_{T1} ...W$	751.61	264.43	334.78	405.40	478.76	550.16	612.23	683.28	775.42
$Q_{T1} ...Var$	90.908	13.074	8.608	31.711	52.915	68.598	85.104	110.55	135.86
$S_{T1} ...VA$	757.08	264.79	334.96	406.72	481.78	554.58	618.20	692.12	787.24
%THD _v (A-C)	3.229	174.11	147.49	128.07	111.60	97.843	86.173	75.074	64.900
%THD _i (A)	4.123	2.567	2.254	1.953	1.771	1.970	2.183	2.513	2.801
PF(A-C)	0.9920	0.998	0.999	0.997	0.993	0.992	0.990	0.987	0.985
DPF(A-C)	0.9929	0.998	0.999	0.997	0.994	0.992	0.990	0.987	0.985
$V_{rms}(B-C)..V$	382.49	276.40	312.07	343.04	374.08	396.92	424.01	445.94	470.54
$I_{rms}(B).. A$	1.988	1.941	1.924	1.945	1.963	1.981	1.994	1.952	1.973
$P_{T2} ...W$	289.38	145.60	159.16	179.76	195.42	221.84	243.27	243.73	272.73
$Q_{T2} ...Var$	702.40	226.39	296.67	368.54	449.27	517.74	593.02	648.03	727.19
$S_{T2} ...VA$	759.68	268.88	336.76	410.24	490.07	563.18	641.13	692.58	776.84
%THD _v (B-C)	3.3941	172.45	147.44	127.84	111.64	97.518	85.785	75.985	65.572
%THD _i (B)	4.395	2.818	2.170	2.104	1.886	2.135	2.462	2.330	2.648
PF(B-C)	0.3809	0.539	0.473	0.439	0.399	0.394	0.380	0.352	0.351
DPF(B-C)	0.3802	0.545	0.477	0.444	0.403	0.397	0.382	0.355	0.353
$P_{3T}=P_{T1}+P_{T2}...W$	1,041	410.03	493.94	585.16	674.18	772.00	855.50	927.01	1,048.05
$Q_{3T}=Q_{T1}+Q_{T2}..Var$	793.308	239.95	305.27	400.25	502.18	586.06	678.12	758.58	863.05
$S_{3T} = \sqrt{P_{3T}^2 + Q_{3T}^2}..VA$	1,308.82	475.07	580.66	708.95	840.65	913.40	1,091.66	1,197.82	1,357.66
$\sum PF_3 = \frac{\sum P_{3T}}{\sum S_{3T}}$	0.795	0.863	0.850	0.825	0.801	0.767	0.783	0.773	0.771
$P_{OUT} = \frac{2\pi N}{60} \cdot T...W$	730.42	138.75	228.81	314.68	394.79	472.28	551.87	630.93	698.87
Torque...N.m.	5	5	5	5	5	5	5	5	5
$N_r...rpm$	1,395	265	437	601	754	902	1,054	1,205	1,357
%Efficiency	70.17	33.83	46.32	53.77	58.55	61.17	64.50	68.06	66.68



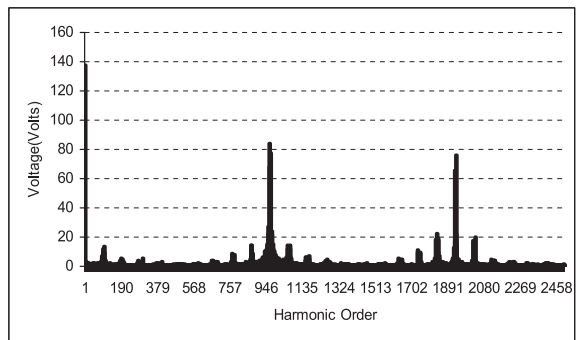
รูปที่ 5 สัญญาณ V_{AC} และ I_A เมื่อปรับความถี่ 50 เฮิรตซ์



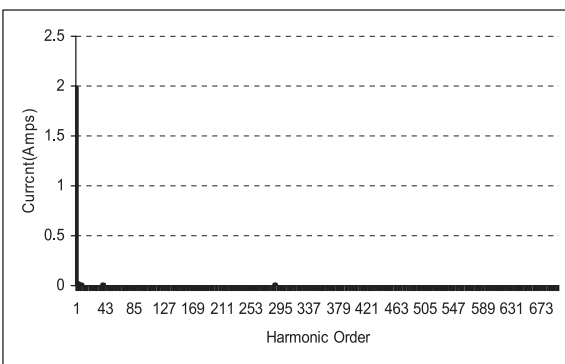
รูปที่ 8 สัญญาณ V_{AC} และ I_A ปรับความถี่ 15 เฮิรตซ์



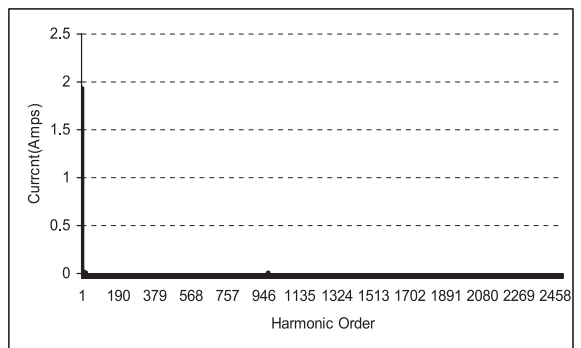
รูปที่ 6 สเปกตรัม V_{AC} ปรับความถี่อินเวอร์เตอร์ 50 เฮิรตซ์



รูปที่ 9 สเปกตรัม V_{AC} ปรับความถี่อินเวอร์เตอร์ 15 เฮิรตซ์



รูปที่ 7 สเปกตรัม I_A ปรับความถี่อินเวอร์เตอร์ 50 เฮิรตซ์



รูปที่ 10 สเปกตรัม I_A ปรับความถี่อินเวอร์เตอร์ 15 เฮิรตซ์

4. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 วิเคราะห์ผลเรื่องกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

1. จากตารางที่ 3 %THDV ทางด้านขาออก อินเวอร์เตอร์มีค่ามากที่สุดที่คลื่นความถี่ 15 เฮิร์ตซ์ เท่ากับ 174.11 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุอันเนื่องจากรูปแบบการควบคุมเป็นลักษณะพีดับเบิลยูเอ็ม ขณะที่มีการลดแรงดันคลื่นมูลฐานลง จะทำให้อัตราส่วนของขนาดแรงดันคลื่นมูลฐานต่อขนาดแรงดันฮาร์โมนิกมีค่าลดลง ยกตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 6 ที่ความถี่มูลฐาน 50 เฮิร์ตซ์ มีขนาดคลื่นมูลฐาน/ขนาดฮาร์โมนิกประมาณลำดับที่ $295 = 400/125 = 3.2$ และจากรูปที่ 9 ที่ความถี่มูลฐาน 15 เฮิร์ตซ์ มีขนาดคลื่นมูลฐาน/ขนาดฮาร์โมนิกประมาณลำดับที่ $946 = 138/85 = 1.62$

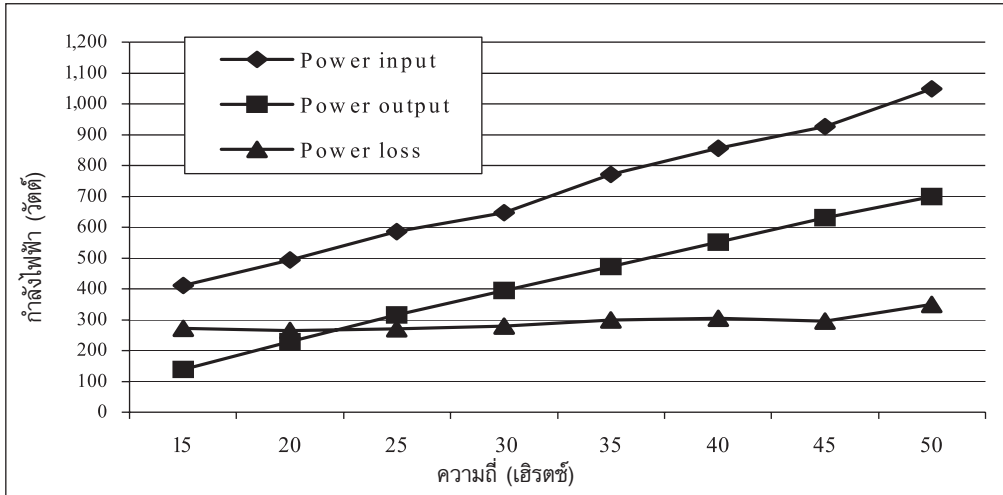
2. จากตารางที่ 3 %THDi ทางด้านขาออกอินเวอร์เตอร์มีค่าอยู่ในช่วง 1.7-2.8 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุอันเนื่องจากการปรับสวิตช์ซึ่งของอินเวอร์เตอร์มีค่าสูง ทำให้อิมพีแดนซ์ที่ลำดับฮาร์โมนิกสูงมีค่ามากขึ้นส่งผลให้กลุ่มฮาร์โมนิกกระแสที่ลำดับฮาร์โมนิกสูงๆ มีค่าต่ำ ผลลัพธ์ทำให้กำลังสูญเสียที่ขดลวดและที่แกนเหล็กมีปริมาณลดลงกว่าการปรับสวิตช์ซึ่งต่ำๆ แต่การปรับสวิตช์ซึ่งสูงจนเกินไปมากๆ ก็เชื่อว่าจะให้ผลลัพธ์ที่ดีเสมอไป สาเหตุเพราะว่าการลดลงของค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดและที่แกนเหล็กมีลักษณะการลดลงเหมือนกับสมการเอ็กโปเนนเชียล [3,5-6] ที่ความถี่สูงมากๆ การลดลงของค่าสูญเสียดังกล่าวมีค่าน้อยมาก แต่อาจส่งผลเสียกับอุปกรณ์ในการสวิตช์ เช่น IGBT ในเรื่องของกำลังสูญเสียในการสวิตช์ (Switch-

ing Loss) หรือขีดจำกัดในด้านการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นการเลือกปรับความถี่ในการสวิตช์ จะต้องพิจารณา ข้อดี-ข้อเสีย ในภาพรวมของระบบด้วย

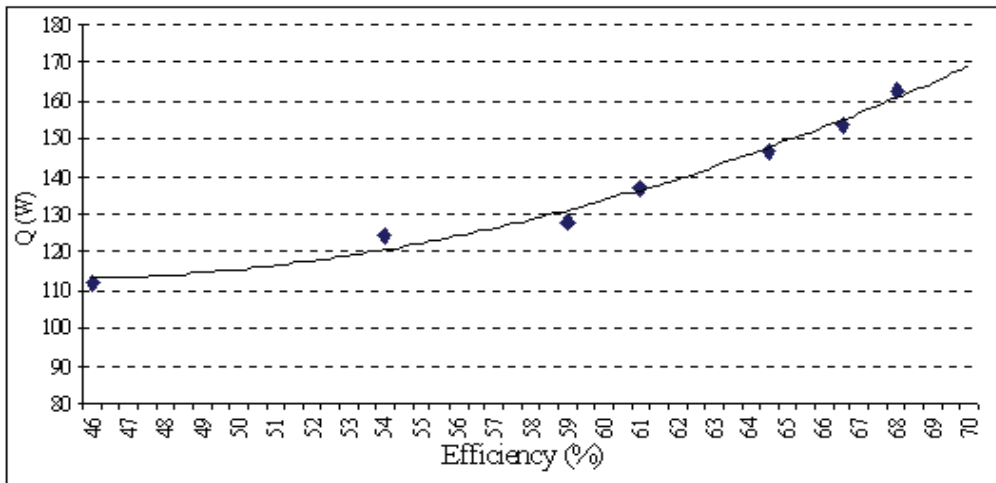
3. จากตารางที่ 3 ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์มีค่ามากที่สุดที่คลื่นสัญญาณชายน้ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ สาเหตุเนื่องจากการใช้แรงดันคลื่นชายน้เป็นแหล่งจ่าย จะไม่ก่อให้เกิดค่าสูญเสียฮาร์โมนิก และในกรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์ค่าประสิทธิภาพลดลงตามคลื่นมูลฐานจาก 50 เฮิร์ตซ์ จนต่ำสุดที่ความถี่ 15 เฮิร์ตซ์ ซึ่งค่าประสิทธิภาพจะแปรตามความถี่มูลฐานอินเวอร์เตอร์

4. จากรูปที่ 11 เห็นได้ว่าเมื่อกำหนดให้แรงบิดของมอเตอร์คงที่ (5 N.m.) ต้องใช้ค่ากำลังขาเข้าอินเวอร์เตอร์และกำลังขาออกของมอเตอร์มีค่ามากที่สุดที่คลื่นความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ และมีค่ากำลังลดลงตามคลื่นความถี่มูลฐานจนต่ำสุดที่ 15 เฮิร์ตซ์ และค่ากำลังสูญเสียของมอเตอร์มีค่ามากที่สุดที่คลื่นความถี่มูลฐาน 50 เฮิร์ตซ์ และมีค่าลดลงตามความถี่มูลฐานแต่จะเป็นเป็นเชิงเส้นโดยมีค่าต่ำสุดที่ 20 เฮิร์ตซ์ สาเหตุอันเนื่องมาจากค่าสูญเสียเนื่องจากแรงลมและแรงเสียดทานของแบร์ริงลดลงหรืออาจเกิดจากค่าสูญเสียเนื่องจากฮาร์โมนิกมีค่าลดลงตามความถี่มูลฐานร่วมด้วย ถ้ามีการปรับความถี่ต่ำกว่า 15 เฮิร์ตซ์ จนกระทั่งความเร็วโรเตอร์เท่ากับศูนย์ นั่นก็หมายความว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย

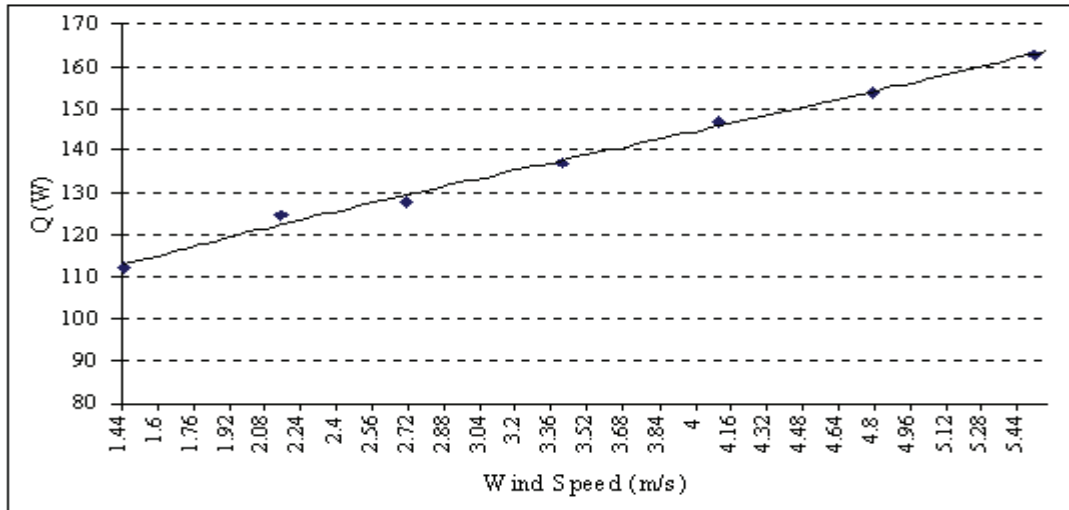
5. จากรูปที่ 12 และรูปที่ 13 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนแปรผันตามประสิทธิภาพของมอเตอร์ และแปรผันตามความเร็วรอบโรเตอร์ ตามลำดับ



รูปที่ 11 กำลังไฟฟ้าจากการทดสอบ แหล่งจ่ายพีดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ 15-50 เฮิรตซ์)



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อประสิทธิภาพมอเตอร์ ที่ $A = 0.1134 \text{ m}^2$, $L = 0.18 \text{ m}$



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อความเร็วรอบมอเตอร์ที่ $A = 0.1134 \text{ m}^2$, $L = 0.18 \text{ m}$

4.2 วิเคราะห์ผลเรื่องอุณหภูมิมอเตอร์

1. จากรูปที่ 14 เป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขดลวดที่ความถี่ 20-50 เฮิร์ตซ์ (ขณะทดสอบใช้ข้อมูลจากตารางที่ 3) ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ จะมีค่าอุณหภูมิที่น้อยที่สุดและมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่อินเวอร์เตอร์ และมากที่สุดที่ 20 เฮิร์ตซ์ [14] สาเหตุอันเนื่องจากการพาความร้อนที่ความเร็วรอบสูงจะมีค่ามากกว่าการพา ความร้อนที่ความเร็วรอบต่ำ ส่วนที่ความถี่ 15 เฮิร์ตซ์ มิได้นำมาพิจารณา เนื่องจากผลการทดสอบอุณหภูมิขดลวดไม่อยู่ในสถานะคงตัว

2. จากรูปที่ 14 เป็นการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขดลวดที่ความถี่ 20-50 เฮิร์ตซ์ (ขณะทดสอบใช้ข้อมูลจากตารางที่ 3 และหาค่าเฉลี่ยเวลาคงตัว (Average Time Constant) โดยการนำค่าเวลาคงตัวของแต่ละความถี่มาหาค่าเฉลี่ย การพิจารณาหาค่าเวลาคงตัวทำได้โดยหาค่าเวลาที่อุณหภูมิเพิ่มขดลวดมีค่าเท่ากับร้อยละ 63 [13] ของค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงสุด ซึ่งได้ผลลัพธ์ของค่าเฉลี่ยเวลาคงตัวที่มีค่าเท่ากับ 21.47 นาที

3. จากรูปที่ 15 เป็นการสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิเพิ่มขดลวดในสถานะคงตัวที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ช่วง 20 - 50 เฮิร์ตซ์ แสดงได้เป็น $\theta_{\text{Wrise_rated (fre)}} = 166.2381 - 5.9063f + 0.1223f^2 - 0.0009f^3$

4. จากรูปที่ 16 เป็นการเปรียบเทียบค่าที่ทดสอบกับทำนายจากโมเดลทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิเพิ่มขดลวดในช่วงสภาวะชั่วคราว ที่ความถี่ช่วง 20 - 50 เฮิร์ตซ์ ซึ่งผลลัพธ์มีค่าใกล้เคียงกัน

5. จากรูปที่ 17 ถึงรูปที่ 18 เป็นการทดสอบและทำนายอุณหภูมิเพิ่มขดลวดและอุณหภูมิขดลวดตามลำดับ โดยมีเงื่อนไขการทดสอบคือคงที่ความถี่ของคลื่นมูลฐาน (เลือกที่ 27 เฮิร์ตซ์) และเปลี่ยนแปลงแรงบิด ($T \sim I[15]$) จากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบ

6. จากรูปที่ 19 ถึงรูปที่ 20 เป็นการทดสอบและทำนายอุณหภูมิเพิ่มขดลวดและอุณหภูมิขดลวดตามลำดับ โดยมีเงื่อนไขการทดสอบคือคงที่แรงบิด (เลือกที่ $T=4 \text{ N.m}$) เปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นมูลฐานจากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบ

7. จากรูปที่ 21 ถึงรูปที่ 22 เป็นการทดสอบและทำนายอุณหภูมิเพิ่มขดลวดและอุณหภูมิขดลวดตามลำดับ โดยมีเงื่อนไขการทดสอบคือเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นมูลฐานและเปลี่ยนแปลงแรงบิด จากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบ

8. จากรูปที่ 23 ถึงรูปที่ 24 เป็นการทดสอบและทำนายอุณหภูมิเพิ่มขดลวดและอุณหภูมิขดลวดตามลำดับ โดยมีเงื่อนไขการทดสอบคงที่แรงบิดที่ 4 N.m . ความถี่

45 เฮิร์ตซ์ โดยทดสอบต่อเนื่องจากรูปที่ 19 และรูปที่ 20 (โดยใช้ผลการทดสอบจากช่วงเวลา 165 นาทีถึง 225 นาที) จากนั้นเพิ่มแรงบิดไปที่ 6.4 N.m. ซึ่งขณะนี้กระแสอยู่ในสภาวะเกินพิกัดโดยมีค่าอยู่ที่ 2.5A จากรูปที่ 23 เห็นได้ว่าอุณหภูมิเพิ่มมีค่าเกินพิกัด (คลาส B = 90°C) จากรูปที่ 24 อุณหภูมิขดลวดมีค่าเกินพิกัด (Class F Ins = 155°C [16]) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ส่วนการทำนายที่สภาวะกระแสเกินพิกัดนี้จะมีค่าผิดพลาดสูง จากรูปค่าการทำนายอุณหภูมิขดลวดจะมีแนวโน้มคงที่ที่ 150 °C

$$\theta_{i_{\text{Wrise(fre)}}} = \left(\frac{1.55}{1.9428} \right)^{1.6} \times \left(166.2381 - (5.906 \times 35) + (0.1229 \times 35^2) - (0.0009 \times 35^3) \right) = 49.80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{i_{\text{Wrise(fre)}}} = \left(\frac{1.935}{1.9428} \right)^{1.6} \times \left(166.2381 - (5.906 \times 22) + (0.1229 \times 22^2) - (0.0009 \times 22^3) \right) = 85.64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{i_{\text{Wrise(fre)}}} = (85.64 - 49.80)(1 - e^{-30/21.47}) + 49.80 = 76.78 \text{ } ^\circ\text{C}$$

หมายเหตุ ค่า t = 30 นาที หมายถึงช่วงเวลาที่มีการเริ่มเปลี่ยนจาก $\theta_{i_{\text{Wrise(fre)}}}$ นาทีที่ 90 ไปเป็นช่วงเวลาที่พิจารณานาทีที่ 120

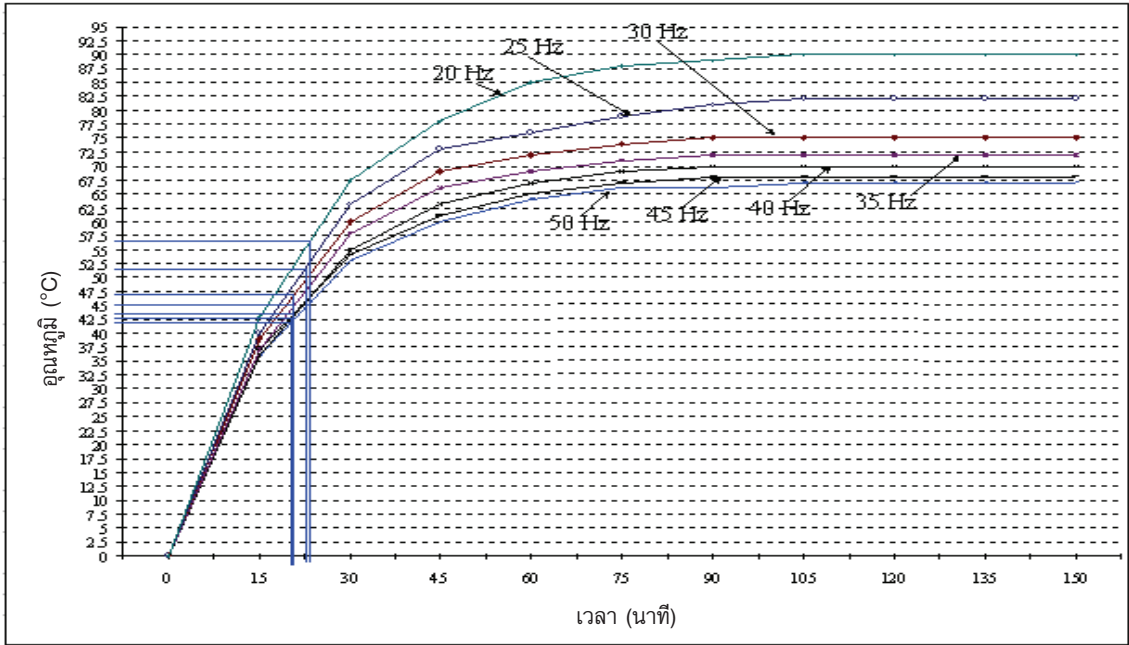
ขีดจำกัดในการทำนายนี้ไม่สามารถทำนายค่าอุณหภูมิที่ใช้ความถี่ต่ำกว่า 20 เฮิร์ตซ์ และที่กระแสมากกว่าพิกัดมอเตอร์ได้ สาเหตุอันเนื่องมาจากที่สภาวะดังกล่าวค่าอุณหภูมิของมอเตอร์สูงขึ้นจนไม่อยู่ในสภาวะคงตัว

โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายโดยการยกตัวอย่างดังต่อไปนี้ การทำนายค่าอุณหภูมิเพิ่มขดลวดที่เวลา 120 นาทีของรูปที่ 21 โดยใช้สมการที่ (28) ถึงสมการที่ (31) ในการคำนวณ

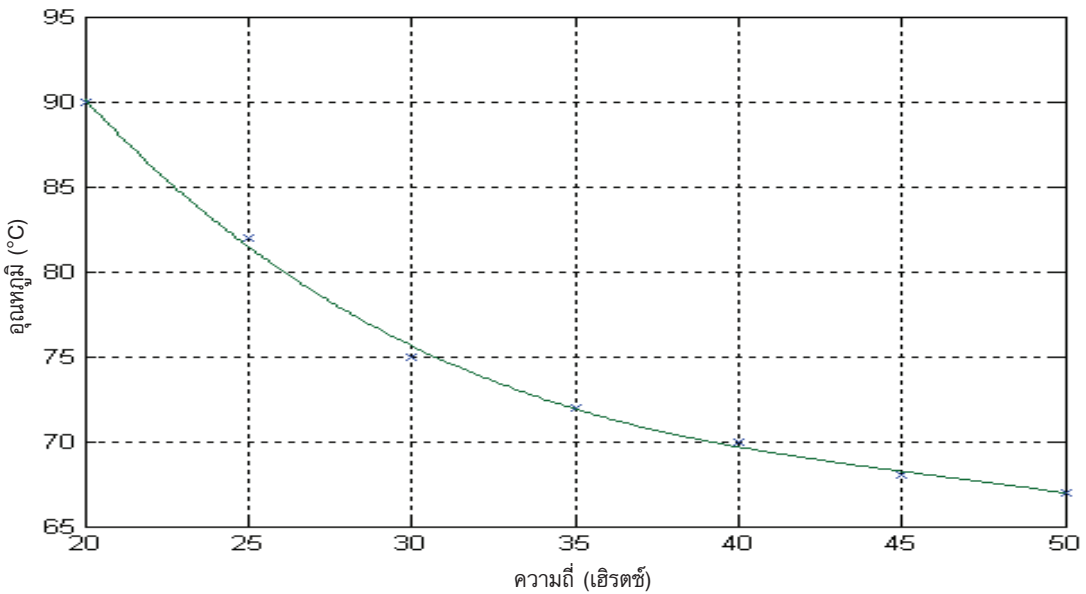
$I_{\text{rms_rated}}$ จากตารางที่ 3 ที่ทุกๆ ความถี่มูลฐานที่ทดสอบจะมีค่าเท่าๆ กัน ดังนั้นเพื่อสะดวกในการคำนวณกับความถี่ที่ไม่ได้เก็บข้อมูล จึงใช้ค่าเฉลี่ย $I_{\text{rms_rated}} = 1.9428$ A ในการคำนวณเป็น ค่า = 1 P.U.

$I_{\text{rms(fre)}}$ เป็นค่ากระแสประสิทธิผลที่ความถี่ใดๆ ของมอเตอร์ ในที่นี้เป็นช่วงความถี่ที่ 20-50 เฮิร์ตซ์

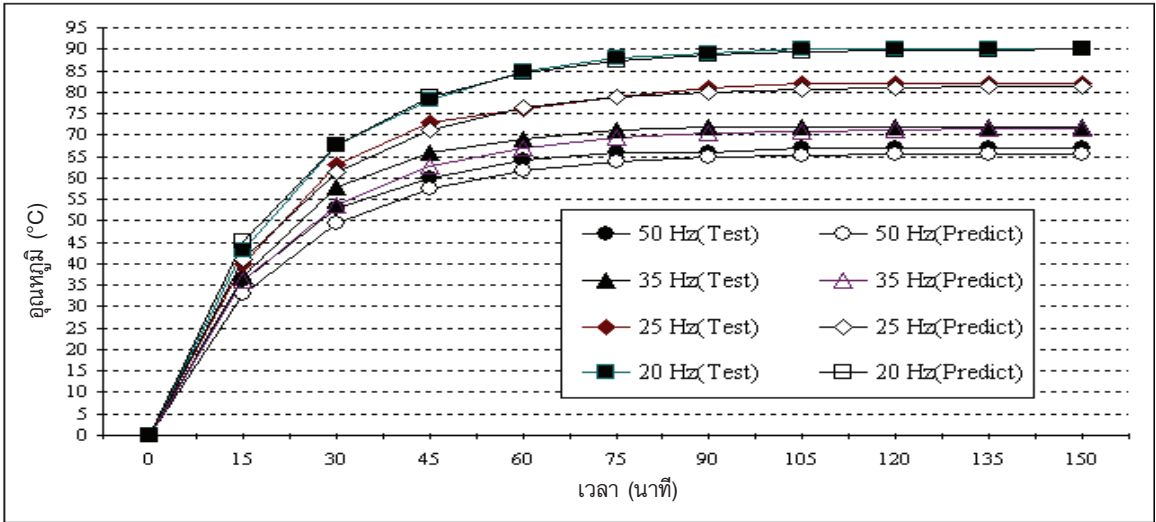
ซึ่งจะทำให้มอเตอร์เกิดการเสียหายได้ ส่วนการนำไปทำนายกับอินเวอร์เตอร์แบบ 6 ขั้น (Six Step Inverter) ได้หรือไม่นั้นเป็นเรื่องที่ต้องนำไปศึกษาขยายผลต่อไป



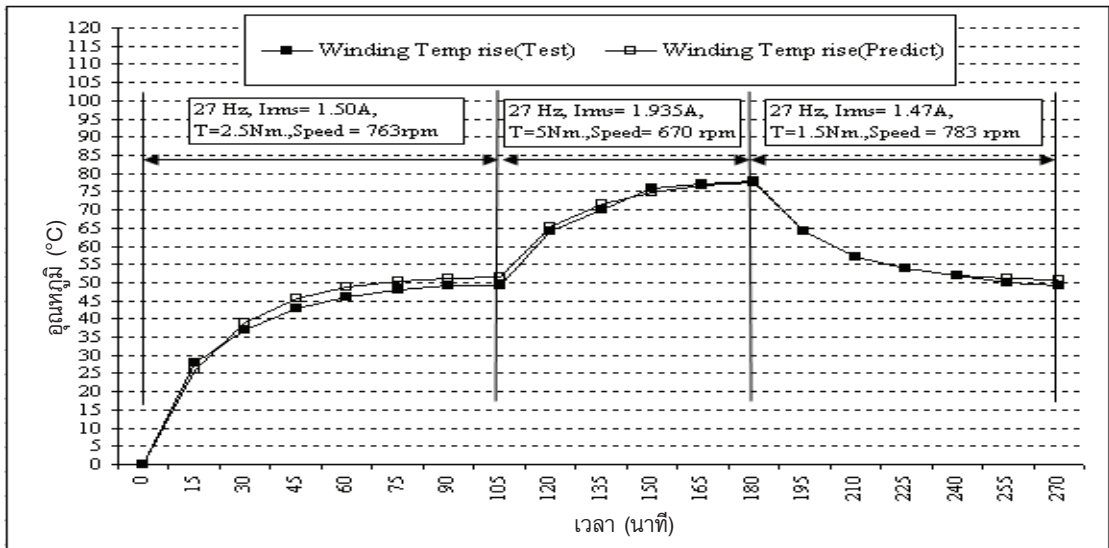
รูปที่ 14 อุณหภูมิเพิ่มขดลวดจากการทดสอบ โดยใช้แหล่งจ่ายพีดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ 20-50 เฮิรตซ์



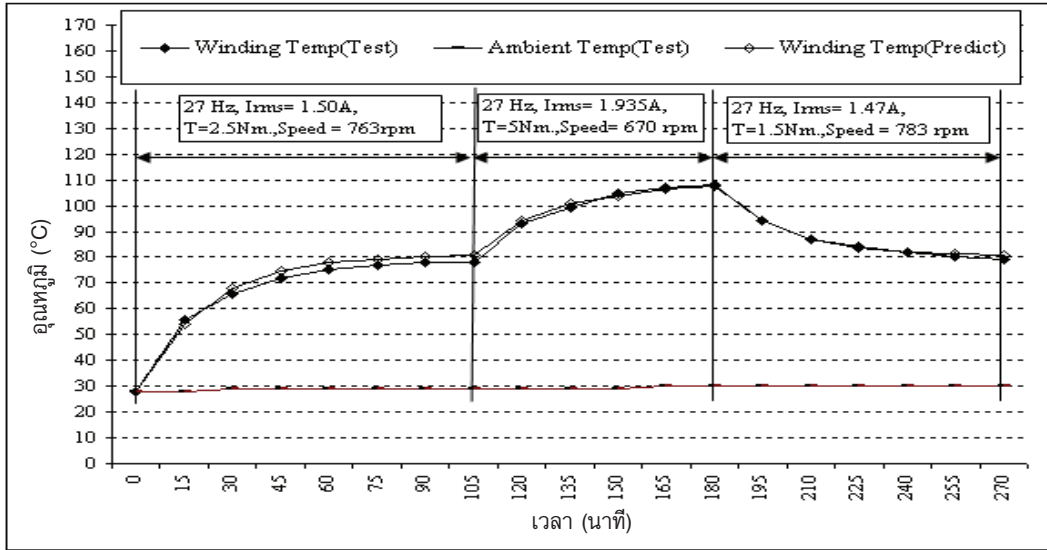
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเพิ่มขดลวดในสภาวะคงตัวกับความถี่คลื่นมูลฐานอินเวอร์เตอร์ เมื่อใช้แหล่งจ่ายพีดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ 20-50 เฮิรตซ์



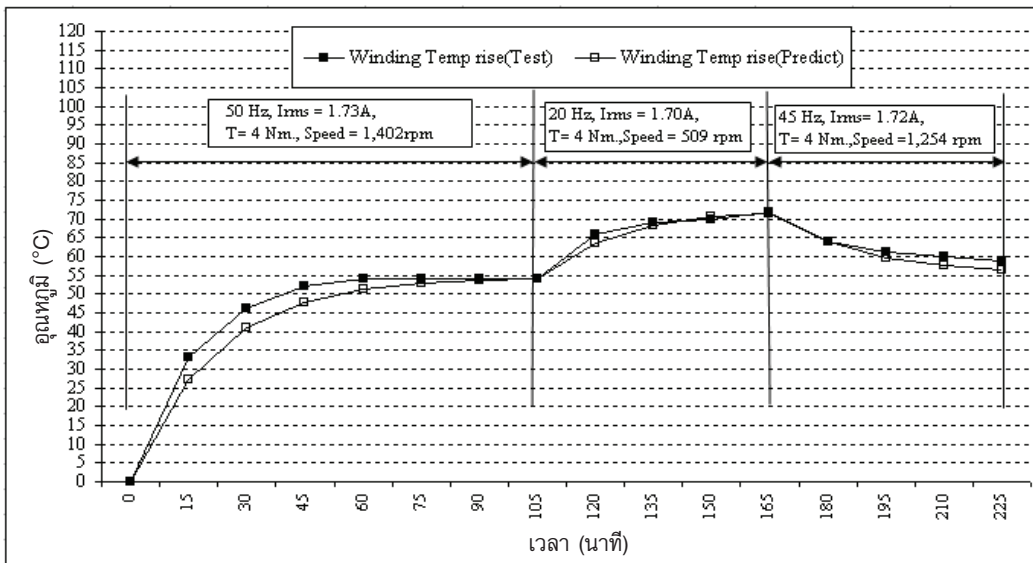
รูปที่ 16 เปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขดลวดจากการทดสอบและทำนาย เมื่อใช้แหล่งจ่ายพีดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์



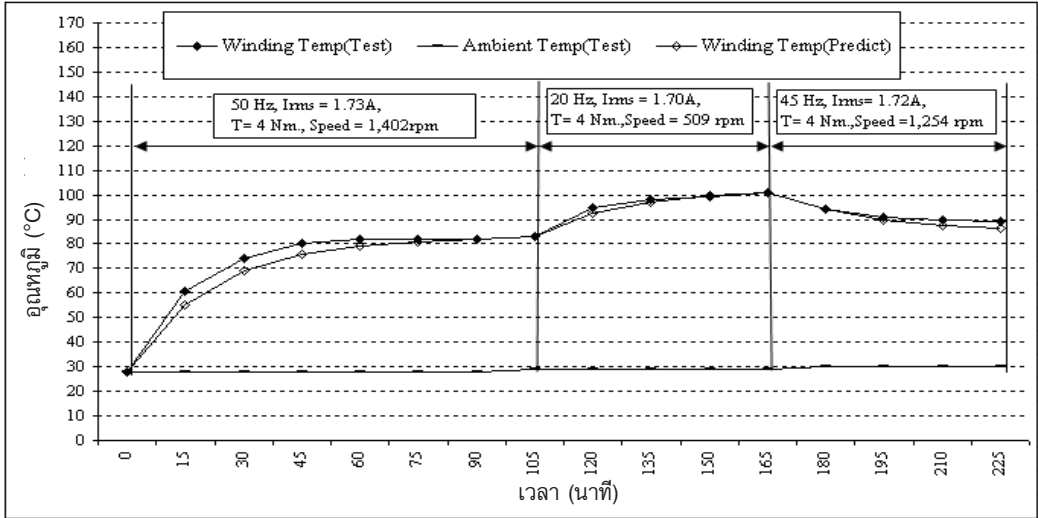
รูปที่ 17 เปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขดลวด จากการทดสอบและทำนาย เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงบิดและคงที่ความเร็ว



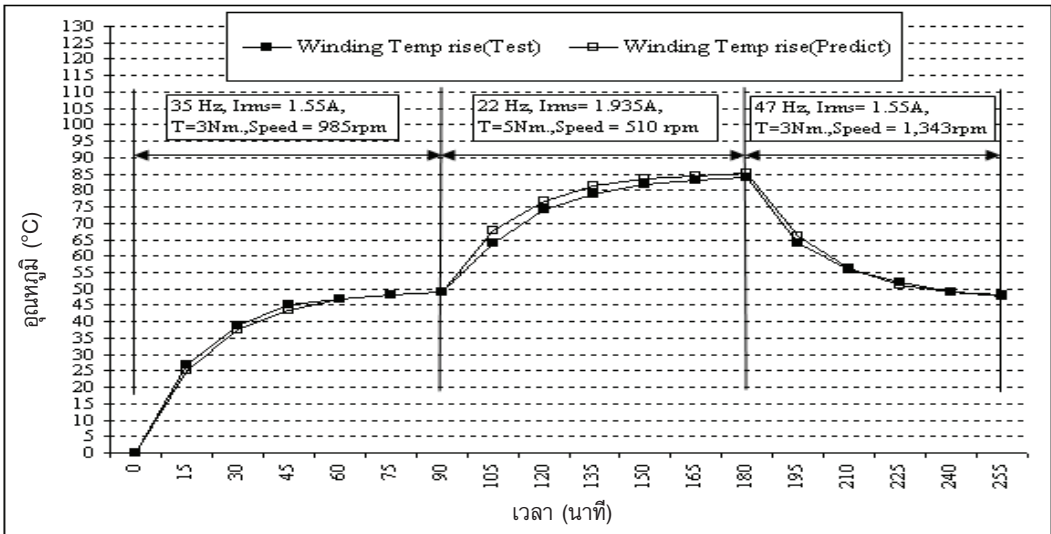
รูปที่ 18 เปรียบเทียบอุณหภูมิขดลวดจากการทดสอบและทำนาย เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงบิดและคงที่ความถี่



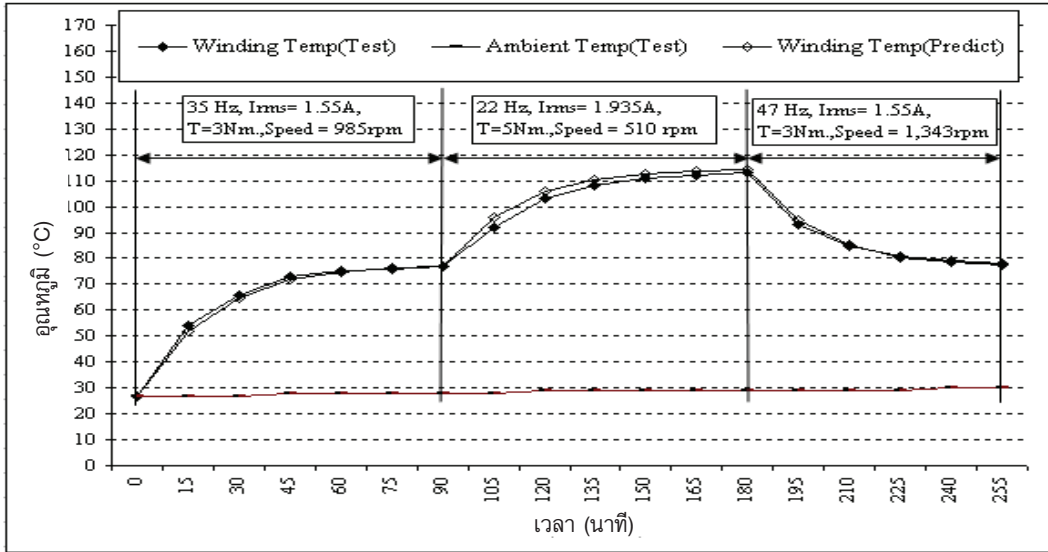
รูปที่ 19 เปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขดลวด จากการทดสอบและทำนาย เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่และคงที่แรงบิด



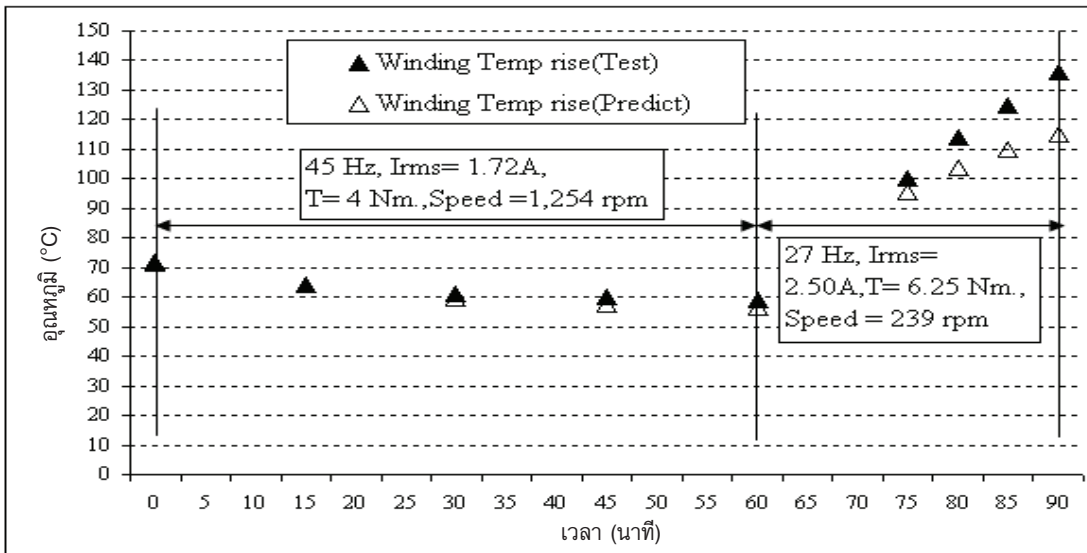
รูปที่ 20 เปรียบเทียบอุณหภูมิขดลวด จากการทดสอบและทำนายเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่และคงที่แรงบิด



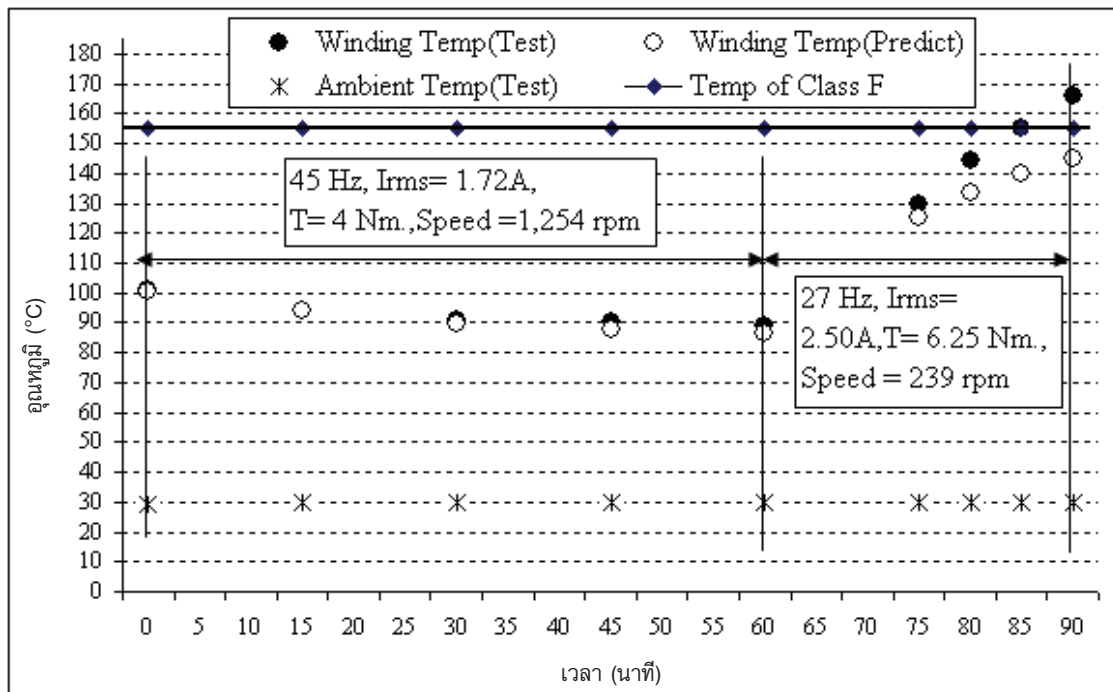
รูปที่ 21 เปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขดลวดจากการทดสอบและทำนาย เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่และแรงบิด



รูปที่ 22 เปรียบเทียบอุณหภูมิขดลวดจากการทดสอบและทำนาย เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่และแรงบิด



รูปที่ 23 เปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขดลวดจากการทดสอบและทำนาย เมื่อกระแสมอเตอร์เกินพิกัด



รูปที่ 24 เปรียบเทียบอุณหภูมิขดลวดจากการทดสอบและทำนาย เมื่อกระแสมอเตอร์เกินพิกัด

5. สรุป

1. จากการทดสอบโดยกำหนดให้แรงบิดมอเตอร์คงที่ การปรับความถี่ของ พัดดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์ระดับต่ำ จะใช้กำลังขาเข้าน้อยกว่าการปรับที่ความถี่สูง แต่ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ความถี่ต่ำจะมีค่าต่ำกว่าที่ความถี่สูง ทั้งกำลังขาเข้าและกำลังขาออกเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะเชิงเส้นและแปรผันตามความถี่ ส่วนอัตรา การถ่ายเทความร้อนแปรผันตามความเร็วรอบมอเตอร์ และแปรผันตามประสิทธิภาพ

2. อุณหภูมิขดลวดมอเตอร์สูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ตัว คือ 1. แหล่งกำเนิดความร้อนนั่นก็คือกระแสไฟฟ้า เมื่อมอเตอร์รับภาระสูงทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดสูง 2. การถ่ายเทความร้อนโดยการพา ที่ความเร็วรอบโรเตอร์ สูงการพาความร้อนจะดีกว่าที่ความเร็วรอบโรเตอร์ต่ำ

3. การทำนายอุณหภูมิขดลวดมอเตอร์จะช่วยให้สามารถป้องกันและวางแผนการทำงานของมอเตอร์ไม่ให้ อุณหภูมิสูงเกินขีดจำกัดของฉนวนของมอเตอร์ได้เป็นอย่างดี

การทดสอบและทำนายจะเป็นประโยชน์อย่างมากกับ บริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ที่ต้องการศึกษาในเรื่องผลกระทบของ อายุการใช้งานมอเตอร์อันเนื่องจากอุณหภูมิเกินขีดจำกัด เมื่อใช้แหล่งจ่ายประเภทพัดดับเบิลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์ เพื่อ จะได้ปรับปรุงแก้ไขหรือพัฒนามอเตอร์ให้มีสมรรถนะที่ดี ในการใช้งาน รวมถึงให้ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์โมเดล นั้นๆ กับผู้ใช้งานเพื่อใช้ในการวางแผนและป้องกันมอเตอร์

6. ข้อเสนอแนะ

เทคนิคการลดค่าผิดพลาดของการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้เทคนิคการวัดแบบ OFF-LINE สามารถทำได้โดยการปรับ Time/div ของสโตเรจอสซิโลสโคปที่ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้มีสัญญาณ จำนวนลูกคลื่นน้อยที่สุดเท่าที่ทำได้ (แต่ไม่น้อยกว่า 1 ลูกคลื่น) ซึ่งจะให้ค่าความถูกต้องสูง

ข้อมูลการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ด้วยสโตเรจอสซิโลสโคป YOKOGAWA รุ่น DL1640 แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การตั้งค่าสต่อเรจออกสซีโลสโคป เพื่อวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์

Fundamental-wave (Hz)	Time/div (ms/div)	Sampling rate (kS/s)	N = Sampling rate / Fundamental frequency (จำนวนข้อมูลต่อ 1 ลูกคลื่น)
15	10	100	6,666
20	10	100	5,000
25	5	200	8,000
30	5	200	6,666
35	5	200	5,714
40	5	200	5,000
45	5	200	4,444
50	5	200	4,000

* ข้อมูลที่ใช้เป็นแฟ้มนามสกุล .CSV แต่ละ Channel สามารถเก็บข้อมูลได้สูงสุด 10,020 ข้อมูล

การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจากสมการที่ (18) (ดูสมการที่ (7) ประกอบ) จะพิจารณาค่าของ V_h , I_h และ ϕ_h ของแต่ละ h ซึ่งค่า h สูงสุด (h_{max}) ได้จากสมการ $h_{max} = \frac{N}{2} (\frac{N}{2})$ เป็นการนำข้อมูลครึ่งหนึ่งของ N ไปเป็นข้อมูลป้อนเข้ากับฟังก์ชัน FFT) แต่เมื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจะใช้ค่าจำนวนฮาร์โมนิกทั้งหมดลบด้วย 1 ($h_{max}-1$) เพราะวลำดับที่ 1 เป็นองค์ประกอบของไฟฟ้ากระแสตรง เช่นกรณีที่เป็นคลื่นมูลฐานที่ 50 เฮิร์ตซ์ การหาค่า P_h จะใช้ V_h , I_h และ ϕ_h ตั้งแต่ลำดับ h ที่ 2-2000 ในการคำนวณเป็นต้น

การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจากสมการที่ (19) สามารถนำค่าแรงดันชั่วขณะและกระแสชั่วขณะคูณกันและหารด้วยจำนวนข้อมูลต่อ 1 ลูกคลื่น (N)

จากการเปรียบเทียบการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของสมการที่ (18) และสมการที่ (19) มีค่าผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative error) เท่ากับ 0.014 % ซึ่งเป็นค่าผิดพลาดที่น้อยมาก แสดงให้เห็นได้ว่าสามารถใช้วิธีใดก็ได้ขึ้นกับความสะดวกและปัจจัยอื่นประกอบร่วมด้วย และในการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้วยสต่อเรจออกสซีโลสโคปได้ทำการวัดค่าซ้ำประมาณ 3 ครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งได้ข้อมูลที่มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้มีความมั่นใจในผลลัพธ์ต่างๆ ว่ามีความถูกต้องสูง

7. เอกสารอ้างอิง

1. TORE M. UNDERLAND and NED MOHAN., 1988, "Overmodulation and Loss Consideration in High Frequency Modulated Transistorized Induction Motors", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 3, No. 4, October, pp. 447-452.
2. Boglietti, A., Ferraris, P., Lazzari, M., and Pastorelli, M., 1996, "Influence of the inverter characteristics on the iron losses in PWM inverter-Fed Induction Motors", *IEEE Trans. on Industry Applications*, IA 32, No. 5, September/October, pp. 1190-1196.
3. Kinnares, V., 1997, *Measurement, Analysis and Prediction of Harmonic Power Losses in PWM FED Induction Motors*, Ph.d. Thesis, Nottingham University, U.K.
4. Suechoey, B., Tadsuan, S., Thammarat, C., and Leelajindakraierk, M., 2004, "Estimation of Core Loss of Transformer under Non-Sinusoidal Voltage Supply", *IEEE Int. Conf. on Power System Technology Powercon 2004*, Singapore, 21-24 Nov.

5. Suechoey, B., Thammarat, C., Tadsuan, S., and Leelajindakraierk, M., 2006, "Single Phase and Three Phase PWM Inverter Supply Optimum Selection for Core Losses Reduction", *The 7th IET Int. Conf. on Advances in power System Control, Operation and Management APSCOM 2006*, Hong Kong, 30 Oct-2 Nov.
6. Suechoey, B., Thammarat, C., Tadsuan, S., and Bunjongjit, S., 2006, "Core Loss Prediction Mathematical Model Design with Single Phase PWM Inverter Supply", *The 7th IET Int. Conf. on Advances in Power System Control, Operation and Management- APSCOM 2006*, Hong Kong, 30 Oct - 2 Nov.
7. Thammarat, C., Suechoey, B., Tadsuan, S., Kinnares, V., and Bunjongjit, S., 2004, "An Analysis of Temperature of Oil-Immersed Transformer under Non-Linear Load", *IEEE Int. Conf. on Power System Technology POWERCON 2004*, Singapore, 21-24 November.
8. Ned, M., Tore, U.M., and William, R.P, 1995, *Power Electronic*, John Wiley and Sons., pp. 203-228
9. YOKOGAWA, *Power Analyzer Manual PZ4000*, 2nd edition, 2000.
10. Thammarat, C., Tadsuan, S., Suechoey, B., and Bunjongjit, S., 2005, "The Result Analysis of the Power loss 3-Phase Induction Motor with PWM Inverter Supply", *IPEC 2005 The 7th International Power Engineering Conference*, Singapore, 29 November-2 December.
11. นกสิทธิ์ คูวัฒนาชัย, 2526, การถ่ายเทความร้อน, ฟิสิกส์เซนต์เตอร์, กรุงเทพฯ, หน้า 42, 236, 244, 442.
12. WILLIAM E. FEATHERINGILL, 1983, "Power Transformer Loading", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.IA. 19, No. 1 January/February, pp. 1190-1196.
13. ANSI/IEEE C57.91-1981, IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immerse Overhead and Pad-Mounted Distribution Transformer Rated 500 kVA and Less with 65°C or 55°C Average winding Rise.
14. J.T. Boys, M.J. Miles., 1994, "Empirical thermal model for inverter-driven cage induction machines", *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 141, No. 6, November, pp. 360-372.
15. Scholey, D., 1982, "Induction Motors for Variable Frequency Power Supplies", *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol.IA-18, No. 4 July/August, pp. 368-372.
16. Emanuel L. Brancato, 1992, "Estimation of Lifetime Expectancies of Motor", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 8, No. 3, May/June, pp. 5-13.