การวิเคราะห์หลักการทำงานของอุปกรณ์ให้ความร้อน ด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง จากด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ มายังด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์

3.1 บทนำ

ในช่วงเวลาที่ผ่านมา อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้มีการพัฒนาและนำมาประชุกต์ใช้ใน งานอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก รวมไปถึงการนำเอาวงจรอินเวอร์เตอร์ กวามถี่สูง ที่สามารถง่าย โหลดอุปกรณ์ให้กวามร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ (Induction Heating) โดยทั่วไปที่ใช้งานในปัจจุบัน นั้นคือ การเปลี่ยนแรงดันไฟสลับที่ได้จากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz ผ่านวงจรเร็กติฟ่าย และใช้ตัว เก็บประจุขนาดใหญ่ทำให้ได้กลื่นแรงดันดีซีตรงเรียบที่มีก่าระลอกแรงดันน้อยที่สุดซึ่งจะเรียก ต่อไปว่า กลื่นแรงดันดีซีตรงเรียบ แล้วใช้วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เปลี่ยนกลื่นแรงดันดีซีตรง เรียบที่ได้เป็นกลื่นแรงดันเอซีสแกวร์ซึ่งมีกวามถี่เท่ากับความถี่สวิทช์ซิ่ง เพื่อป้อนให้กับวงจร เรียบที่ได้เป็นกลื่นแรงดันเอซีสแกวร์ซึ่งมีกวามถี่เท่ากับความถี่สวิทช์ซิ่ง เพื่อป้อนให้กับวงจร เรโซแนนท์อนุกรม RLC ของโหลด ทำให้ได้กระแสฟันดาเมนทอลที่จ่ายให้กับโหลด ซึ่งการ วิเกราะห์สมการกระแสฟันดาเมนทอลของโหลดเพื่อนำไปสู่การหากำลังไฟฟ้าทางด้านเอซีเอาท์พุท ของอินเวอร์เตอร์ และกำลังไฟฟ้าทางด้านดีซีอินพุทของอินเวอร์เตอร์ ในกรณีแรงดันด้านดีซีอินพุท ของอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นกลื่นแรงดันดีซีดรงเรียบ ได้มีการวิเกราะทำได้มีการพันด้านดีซีอินพุท ของอินเวอร์เตอร์มีลักบนระจุขนาดใหญ่นั้น จะส่งผลทำให้กระแสทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz มีลักษณะกลิ่นกระแสไม่เป็นกลื่นไซน์ มีค่าเทาเวอร์แฟ็กเตอร์ท่าประมาณ 0.5 - 0.6 โดยจะส่งผล กระทบต่อระบบรวมของแหล่งจ่ายการไฟฟ้าได้ในที่สุด ซึ่งสามารถเปรียบเทียบหลักการเดิมและ หลักการใหม่ได้ดังนี้

<u>หลักการเดิม</u> จากหลักการเดิมนั้น ทางด้านหลังของวงจรเร็กติฟาย ของวงจรฟูลบริดจ์ อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) จะมีตัวเก็บประจุ (C_d) ที่มีขนาดใหญ่ต่ออยู่ เพื่อให้ได้กลื่นแรงดันดีซีตรงเรียบ (v_d) ป้อนให้กับ วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 3.1 และผลจากตัวเก็บประจุดังกล่าวจะทำให้กลื่นแรงดัน ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า(v_s) และกระแส (i_s) ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้ามีลักษณะคลื่นไม่ เป็นไซน์ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่ความถิ่สวิทช์ของอินเวอร์เตอร์ 60 kHz อุณหภูมิชิ้นงาน 400 °C ค่าเพาเวอร์แฟ็กเตอร์ที่ได้ นี้มีค่าต่ำเนื่องจากกระแสไม่เป็นไซน์ ดังนั้นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) ซึ่งใช้หลักการดังกล่าวนี้จึงยังไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรฟูลบริคจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน ด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง(Induction Heating) กรณีที่แรงดันทางด้านอินพุทของ อินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นคลื่นแรงดันดีซีตรงเรียบ



ร**ูปที่ 3.2** ลักษณะคลื่นแรงคันทางค้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า (*v_s*) และคลื่นกระแสทางค้านแหล่งจ่าย การไฟฟ้า(*i_s*) ในกรณีที่อินพุทของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงคันดีซีตรงเรียบที่ได้ จากการทดลอง (*x* : 2*ms / div*)



ร**ูปที่ 3.3** ลักษณะคลื่นแรงคันทางค้านเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ (*v_o*) และคลื่นกระแสทางค้านเอาท์พุท อินเวอร์เตอร์ (*i_o*) ในกรณีที่อินพุทของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงคันดีซีตรงเรียบ ที่ได้จากการทดลอง (*x* : 2*ms / div*)



ร**ูปที่ 3.4** ลักษณะคลื่นแรงคันทางค้านเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์(*v_o*) และคลื่นกระแสทางค้านเอาท์พุท อินเวอร์เตอร์ (*i_o*) ในกรณีที่อินพุทของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงคันคีซีตรงเรียบที่ได้จาก การทคลอง (*x* : 50*µs / div*)

ดังนั้นเพื่อต้องการให้อุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงนี้เหมาะสมที่จะ นำไปใช้งานได้เป็นอย่างดี จะต้องทำการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟ็คเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ให้มีก่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงได้นำเสนอแนวทางแก้ไขเพื่อปรับปรุงก่าเพาเวอร์แฟ็คเตอร์ให้มีก่าใกล้เกียง 1 ดังต่อไปนี้

<u>หลักการใหม่</u> หลักการใหม่จะเป็นการนำตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ที่อยู่ทางด้านหลังของ วงจรเร็กติฟายออกและทำการเพิ่มวงจร *LC* ฟิลเตอร์เข้าไปทางด้านหน้าของวงจรเร็กติฟาย ดังรูปที่ 3.5 ทำให้ได้กลื่นแรงดันที่ป้อนให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นกลื่นแรงดันดีซีเร็กติฟาย 100 Hz ซึ่งจะมีลักษณะและการวิเกราะห์ต่างจากหลักการเดิมที่เป็นกลื่นแรงดันดีซีตรงเรียบ



รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรฟูลบริคจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลคเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน ด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) กรณีที่แรงคันทางด้านอินพุทของ อินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงคันดีซีเร็กติฟาย 100 Hz



ร**ูปที่ 3.6** ลักษณะคลื่นแรงดังทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า (*v*_s) และคลื่นกระแสทางด้านแหล่งจ่าย การไฟฟ้า (*i*_s) ในกรณีที่อินพุทของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงดันดีซีเร็กติฟาย 100 Hz ที่ได้ จากการทดลอง (*x* : 2*ms / div*)



ร**ูปที่ 3.7** ลักษณะคลื่นแรงคันทางด้านเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ (v_o) และคลื่นกระแสทางด้านเอาท์พุท อินเวอร์เตอร์ (i_o) ในกรณีที่อินพุทของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงคันดีซีเร็กติฟาย 100 Hz ที่ได้จากการทดลอง (x : 2ms / div)



ร**ูปที่ 3.8** ลักษณะคลื่นแรงคันทางด้านเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ (*v_o*) และคลื่นกระแสทางด้าน เอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ (*i_o*) ในกรณีที่อินพุทของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงคันดีซี เร็กติฟาย 100 Hz ที่ได้จากการทคลอง (*x* : 50*µs / div*) หลังจากได้กลิ่นแรงคันดีซีเร็กติฟาย 100 Hz ทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์แทนกลิ่นแรงคันดีซี ตรงเรียบในแบบเก่า เมื่อนำไปผ่านวงจรฟูลบริคง์อินเวอร์เตอร์เพื่อเปลี่ยนกลิ่นแรงคันดีซีเร็กติฟาย 100 Hz ที่ได้ เป็นกลิ่นแรงคันเอซีสแควร์ทางด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตาม ระดับแรงคันดีซีเร็กติฟายทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ แล้วนำแรงคันที่ได้ป้อนเป็นแรงคัน อินพุทให้กับวงจรเรโซแนนท์อนุกรม RLC ของโหลด เพื่อคำนวณหาค่ากระแสฟันดาเมนทอลของ โหลด เมื่อนำไปคำนวณร่วมกับแรงคันฟันดาเมนทอลที่ป้อนให้กับวงจรเรโซแนนท์อนุกรม RLC ของ โหลด เมื่อนำไปคำนวณร่วมกับแรงคันฟันดาเมนทอลที่ป้อนให้กับวงจรเรโซแนนท์อนุกรม RLC ของ โหลด จะสามารถนำไปสู่การหากำลังไฟฟ้าทางด้านเอซีเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ และยังสามารถ นำสมการคลื่นกระแสฟันดาเมนทอลทางด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถคำนวณได้แล้วนี้ ข้อนกลับไปหาสมการคลื่นกระแสทางด้านดีซีอินพุทของอินเวอร์เตอร์และนำไปเชื่อมโยงเข้ากับ กระแสทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz เมื่อผ่านวงจรฟิลเตอร์แล้ว กระแสที่ดึงจากแหล่งจ่ายการ ไฟฟ้า 50-Hz จะเป็นกระแสไซน์50-Hz *i*, ที่อินเฟสกับแรงคันการไฟฟ้า 50-Hz ดังรูปที่ 3.6 ซึ่ง สามารถทำให้กำนวณหาก่ากระแสนี้ได้เพื่อนำไปสู่การหาก่ากำลังไฟฟ้าทางด้านดีซีอินพุทของ อินเวอร์เตอร์ ก่กำลังไฟฟ้าด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ก่าเพาเวอร์เพื่ดเลอร์ทางด้านเหล่งจ่ายการ ไฟฟ้า และก่าประสิทชิภาพของวงจรรวมระหว่างเร็กติฟายเออร์และอินเวอร์เตอร์ ในกรณีแรงคัน ด้านดีซีอินพุทของอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นกลิ่นแรงดันดีซีเร็กติฟาย 100 Hz ได้ในที่สุด

3.2 การทำงานของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่จ่ายโหลดอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วย การเหนี่ยวนำความถี่สูง

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้ทำการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟ็กเตอร์ทางด้านแหล่งง่ายการไฟฟ้า ให้มีก่าสูงสุดเป็น 1 ในขณะที่ด้านโหลดของอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการ เหนี่ยวนำความถี่สูง ซึ่งขั้นตอนการกำนวณจะเริ่มจากการกำนวณหาก่าแรงดันฟันดาเมนทอล $v_{ok,1}$ จากกลิ่นแรงดันสแกวร์ทางด้านเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ $v_{ok,n}$ ซึ่งได้จากก่าแรงดันด้านดีซี V_{dk} ในแต่ ละสเต็ปย่อย ๆ ของกลิ่นแรงดัน v_d ลักษณะกลิ่นเร็กติฟายด้านดีซี ซึ่งมีแต่ละช่วงสเต็ปย่อยห่าง เท่ากัน จากนั้นจะนำกลิ่น $v_{ok,1}$ ในแต่ละช่วงย่อยนี้ ป้อนเป็นแรงดันอินพุทให้กับวงจรเรโซแนนท์ อนุกรม RLC ของโหลด เพื่อกำนวณหาก่ากระแสโหลด $i_{ok,1}$ ของวงจรเรโซแนนท์นี้ $i_{ok,1}$ ที่ได้จะ เป็นตัวแปรที่สำคัญ เนื่องจากสามารถนำไปสู่การกำนวณหาก่ากระแส i_{dk} ทางด้านดีซีในแต่ละช่วง ย่อยนั้น ซึ่งเมื่อนำไปกำนวณร่วมกับแรงดันดีซี V_{dk} ในแต่ละสเต็ป ก็สามารถนำไปสู่การกำนวณหา ก่ากำลังไฟฟ้า P_d ที่ป้อนให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ด้านดีซีอินพุทได้ นอกจากนั้น $i_{ok,1}$ เมื่อนำไป กำนวณร่วมกับคลื่นฟันดาเมนทอล $v_{ok,1}$ ของแรงดันเอาท์พุทสแกวร์ทางด้านเอาท์พุทของ อินเวอร์เตอร์ $v_{ok,n}$ ในแต่ละสเต็ป ก็จะสามารถกำนวณหาก่ากำลังไฟฟ้าเอซี P_o ทางด้านเอาท์พุทที่ จ่ายให้กับอุปกรณ์ให้กวามร้อนด้วยการเหนี่ยวนำนี้ได้



ร**ูปที่ 3.9** องค์ประกอบต่าง ๆ ของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน ด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) ที่มีการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟ็คเตอร์ ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าให้มีค่าสูงสุดเป็น 1

การวิเคราะห์หลักการทำงานของอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง จาก ด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์มายังด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายโหลดอุปกรณ์ให้ความร้อน ด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง สามารถแบ่งการวิเคราะห์หลักการทำงานได้ดังต่อไปนี้

3.3 การวิเคราะห์สมการคลื่นแรงดันอินพุทของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงดันดีซี เร็กติฟาย

การวิเคราะห์หาสมการคลื่นแรงคันและกระแสทางด้านเอซีเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่มี อินพุทของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงคันดีซีเร็กติฟาย v_d แทนแรงคันดีซีตรงเรียบ โดยที่แรงคัน v_{ok,n} และกระแส i_{ok,n} ทางด้านเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ในแต่ละคาบของการสวิทช์เกิดจากการตัดต่อ แรงคันดีซีเร็กติฟาย v_d ในแต่ละช่วงย่อย[10] ซึ่งสามารถพิจารณาให้เป็นแรงคันดีซีเร็กติฟาย v_d นี้ ให้มีก่าเฉลี่ยกงที่เท่ากับ V_{dk} ดังสมการที่ (3.1)



รูปที่ 3.10 ค่าเฉลี่ยแรงคันเร็กติฟายในแต่ละช่วงย่อย

$$V_{dk} = V_{d1}, V_{d2}, V_{d3}, \dots = V_{F,p} \sin\left[\frac{2\pi k - \pi}{m_f}\right]$$
(3.1)

และเมื่อแทนค่า k ใดๆ ที่ k เท่ากับ 1 , 2 , 3 , ...ก็จะ ได้ดังสมการ

$$V_{d1} = V_{F,p} \sin\left[\frac{\pi}{m_f}\right] , \quad V_{d2} = V_{F,p} \sin\left[\frac{3\pi}{m_f}\right] , \quad V_{d3} = V_{F,p} \sin\left[\frac{5\pi}{m_f}\right] , \dots \quad (3.2)$$



ร**ูปที่ 3.11** การพิจารณาแรงคันเอซีสแควร์ _{V_{ok,n} ทางค้านเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์จากค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วง ย่อยของแรงคันดีซีเร็กติฟาย V_{dk}}

3.4 การวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาสมการแรงดันและกระแสฟันดาเมนทอลทางด้านเอาท์พุท ของอินเวอร์เตอร์

จากแรงคันในแต่ละสเต็ปช่องย่อยของV_{dk} สามารถนำมาผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อ คำนวณหาสมการแรงคันคลื่นสแควร์ v_{ok,n} ทางด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ได้ดังสมการที่ (3.3) โดยที่ m_f คือ อัตราการมอดูเลตเชิงความถี่ f_s/2f และ v_{o,p} < v_{F,p}

$$v_{ok,n} = \frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{2\pi k - \pi}{m_f}\right] \times \left[\sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} \left(\frac{1}{2n-1}\right) \sin\left(2n-1\right)\omega_{\rm s}t\right]$$
(3.3)

เมื่อแทนค่า k ใดๆ ที่ k เท่ากับ 1, 2, 3, ... และแทนค่า n เท่ากับ 1, 2, 3, ...ในสมการ ที่ (3.3) ทำให้ได้สมการที่ (3.4), (3.5) และ (3.6) ตามลำดับ

$$v_{ol,n} = \frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{\pi}{m_f}\right] \times \left[\sin\left(\omega_s t\right) + \frac{1}{3}\sin\left(3\omega_s t\right) + \frac{1}{5}\sin\left(5\omega_s t\right) + \dots\right]$$
(3.4)

$$v_{o2,n} = \frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{3\pi}{m_f}\right] \times \left[\sin\left(\omega_s t\right) + \frac{1}{3}\sin\left(3\omega_s t\right) + \frac{1}{5}\sin\left(5\omega_s t\right) + \dots\right]$$
(3.5)

$$v_{o3,n} = \frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{5\pi}{m_f}\right] \times \left[\sin\left(\omega_s t\right) + \frac{1}{3}\sin\left(3\omega_s t\right) + \frac{1}{5}\sin\left(5\omega_s t\right) + \dots\right]$$
(3.6)



รูปที่ 3.12 การพิจารณาแรงดันเอซีสแควร์ $v_{ok,n}$ ด้านเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ที่ k = 1 , 2 และ 3



ร**ูปที่ 3.13** การพิจารณาแรงคันเอซีสแควร์ $v_{ok,n}$ ทางด้านเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ที่ k ใดๆ

แล้วนำแรงคันที่ได้นี้ ป้อนเป็นแรงคันอินพุทให้กับวงจรเรโซแนนท์อนุกรม RLC ของ โหลด เพื่อคำนวณหาก่ากระแสฟันคาเมนทอลของโหลด ดังรูปที่ 3.14



ร**ูปที่ 3.14** การป้อนแรงคันเอซีสแควร์ _{v_{ok,n} ด้านเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ให้กับวงจร RLC เรโซแนนท์ แบบอนุกรม}

เนื่องจากกระแสทางด้านเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ i_{ok,n} มีลักษณะคลื่นใกล้เคียงไซน์ ดังนั้นใน การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า P_o ทางด้านเอซีเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์จึงสามารถคำนวณได้จาก คลื่นแรงดันเอซีสแควร์ v_{ok,n} ทางด้านเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ในสมการที่(3.3) โดยพิจารณาเฉพาะ องค์ประกอบฟันดาเมนทอลของแรงดัน v_{ok,1} ดังสมการที่ (3.7) และกระแสฟันดาเมนทอล i_{ok,1} ดัง สมการที่ (3.12) ซึ่งได้จากการป้อนแรงดัน v_{ok,1} ผ่านวงจรโหลดเรโซแนนท์ RLC ซึ่งมีลักษณะคลื่น แรงดันและเฟสเซอร์ ดังรูปที่ 3.15

$$v_{ok,1} = \left(\frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{2\pi k - \pi}{m_f}\right]\right) \sin\left(\omega_s t\right)$$
(3.7)

$$V_{ok,1} = V_{ol,1}, V_{o2,1}, V_{o3,1}, \dots = \frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{2\pi k - \pi}{m_f}\right]$$
(3.8)
$$= \frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{\pi}{m_f}\right], \frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{3\pi}{m_f}\right], \frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{5\pi}{m_f}\right], \dots$$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.14 กระแสทางด้านเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ i_{ok,1} ในวงจรสามารถหาได้ โดยใช้สมการที่ (3.9) และ (3.10) ดังนี้

$$v_{ok,1} = L_{eq} \frac{dt_{ok,1}}{dt} + \frac{1}{C_{eq}} \int \dot{t}_{ok,1} d\omega_s t + R_{eq} \dot{t}_{ok,1}$$
(3.9)
$$\dot{t}_{ok,1} = I_s \sin \omega_s t + I_C \cos \omega_s t \qquad (3.10)$$

 $v_{ok,1} = V_S \sin \omega_s t + V_C \cos \omega_s t$ (3.11)

เมื่อแก้สมการที่ (3.9) , (3.10) และ (3.11) สามารถหาค่ากระแสทางด้านเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ *i_{ok,1}* ได้ดังสมการที่ (3.12)

$$i_{ok,1} = \frac{R_{eq}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{2}\left(\frac{4}{\pi}V_{o,p}\sin\left[\frac{2\pi k - \pi}{m_{f}}\right]\right)}{L_{eq}^{2}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{4} - 2L_{eq}C_{eq}\omega_{s}^{2} + 1 + R_{eq}^{2}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{2}}\cos(\omega_{s}t) \qquad (3.12)$$

$$+ \frac{C_{eq}\omega_{s}\left(\frac{4}{\pi}V_{o,p}\sin\left[\frac{2\pi k - \pi}{m_{f}}\right]\right)(L_{eq}C_{eq}\omega_{s}^{2} - 1)}{L_{eq}^{2}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{4} - 2L_{eq}C_{eq}\omega_{s}^{2} + 1 + R_{eq}^{2}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{2}}\sin(\omega_{s}t)$$



รูปที่ 3.15 อธิบายการวิเคราะห์แรงคันในวงจรเรโซแนนท์อนุกรมที่มีแหล่งจ่ายเป็นแรงคันขั้นบันไค

จากสมการคลื่นแรงคัน v_o และกระแส i_o ทางด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ของวงจร ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) กรณีที่แรงคันทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงคันดีซีเร็กติฟาย 100Hz ที่ได้ จากการวิเคราะห์ เมื่อนำมาเขียนลักษณะคลื่นโดยใช้โปรแกรม MATLAB และเพื่อเป็นการยืนยัน ความถูกต้องของสมการ จึงนำคลื่นแรงคัน v_o และกระแส i_o ด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ ที่ได้



ร**ูปที่ 3.16** ลักษณะคลื่นแรงคัน _{vo} และ กระแส i_o ที่ได้จากการซิมมูเลตเปรียบเทียบกับการทดลอง ด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ (x : 2ms / div)



ร**ูปที่ 3.17** ลักษณะคลื่นแรงคัน _v และกระแส i_o ที่ได้จากการซิมมูเลตเปรียบเทียบกับการทดลอง ด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ (x : 1ms / div)



ร**ูปที่ 3.18** ลักษณะคลื่นแรงคัน _{Vo} และกระแส i_o ที่ได้จากการซิมมูเลตเปรียบเทียบกับการทดลอง ด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ (x : 500 µs / div)



ร**ูปที่ 3.19** ลักษณะคลื่นแรงคัน _v, และกระแส i, ที่ได้จากการซิมมูเลตเปรียบเทียบกับการทดลอง ด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ (x : 200 μs / div)

Theory	Frneriment +100us/div
Incory	Ехретинени
v i	v i

ร**ูปที่ 3.20** ลักษณะคลื่นแรงคัน _{Vo} และกระแส i_o ที่ได้จากการซิมมูเลตเปรียบเทียบกับการทดลอง ด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ (x : 100 µs / div)



ร**ูปที่ 3.21** ลักษณะคลื่นแรงคัน _v และกระแส i_o ที่ได้จากการซิมมูเลตเปรียบเทียบกับการทดลอง ด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ (x : 2 µs / div)

3.5 การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่ง่ายให้กับอุปกรณ์ให้ ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง



ร**ูปที่ 3.22** อธิบายการคำนวณวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้า*P_{o1}*ทางด้านเอซีเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ ในสเต็ปช่วงย่อยที่ 1 จากรูปที่ 3.22 เมื่อนำกระแสฟันดาเมนทอล i_{ok,1} ที่ k=1 ดังสมการที่ (3.13) ไปคำนวณ ร่วมกับคลื่นแรงดันฟันดาเมนทอล v_{ok,1} ที่ k=1 ดังสมการที่ (3.14) ในสเต็ปช่วงย่อยที่ 1 ก็จะสามารถ กำนวณหาค่ากำลัง ไฟฟ้า P_{o1}ทางด้านเอซีเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ ได้ดังสมการที่ (3.15) และ สมการที่ (3.16)

$$i_{o1,1} = \frac{R_{eq}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{2}\left(\frac{4}{\pi}V_{o,p}\sin\left[\frac{\pi}{m_{f}}\right]\right)}{L_{eq}^{2}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{4} - 2L_{eq}C_{eq}\omega_{s}^{2} + 1 + R_{eq}^{2}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{2}}\cos(\omega_{s}t)$$

$$+ \frac{C_{eq}\omega_{s}\left(\frac{4}{\pi}V_{o,p}\sin\left[\frac{\pi}{m_{f}}\right]\right)(L_{eq}C_{eq}\omega_{s}^{2} - 1)}{L_{eq}^{2}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{4} - 2L_{eq}C_{eq}\omega_{s}^{2} + 1 + R_{eq}^{2}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{2}}\sin(\omega_{s}t)$$
(3.13)

เมื่อนำกระแสฟันคาเมนทอล i_{ok,1} ที่ k=1 มาพิจารณาร่วมกับคลื่นแรงคันฟันคา เมนทอล_{v_{ok,1} ที่ k=1 คังสมการที่ (3.14)}

$$v_{o1,1} = \left(\frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{\pi}{m_f}\right]\right) \sin\left(\omega_s t\right)$$
(3.14)

สามารถนำไปสู่การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า P_{o1}ทางด้านเอซีเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่ k=1 ได้ดังสมการที่ (3.15)

$$P_{o1} = \left(\frac{V_{o1,1}I_{o1,1}}{2}\right)\cos\beta \tag{3.15}$$

$$P_{o1} = \left(\frac{1}{2} \left(\frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{\pi}{m_{f}}\right]\right) \left[\left(\frac{R_{eq} C_{eq}^{2} \omega_{s}^{2} \left(\frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{\pi}{m_{f}}\right]\right)}{L_{eq}^{2} C_{eq}^{2} \omega_{s}^{4} - 2L_{eq} C_{eq} \omega_{s}^{2} + R_{eq}^{2} C_{eq}^{2} \omega_{s}^{2} + 1} \right)^{2}$$
(3.16)

$$+\left(\frac{C_{eq}\omega_s\left(L_{eq}C_{eq}\omega_s^2-1\right)\left(\frac{4}{\pi}V_{o,p}\sin\left[\frac{\pi}{m_f}\right]\right)}{L_{eq}^2C_{eq}^2\omega_s^4-2L_{eq}C_{eq}\omega_s^2+R_{eq}^2C_{eq}^2\omega_s^2+1}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}\cos\beta$$



ร**ูปที่ 3.23** อธิบายการคำนวณวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้า P_{o2} ทางด้านเอซีเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ ในสเต็ปช่วงย่อยที่ 2

จากรูปที่ 3.23 เมื่อนำกระแสฟันดาเมนทอล i_{ok,1} ที่ k=2 ดังสมการที่ (3.17) ไปคำนวณ ร่วมกับคลื่นแรงดันฟันดาเมนทอล v_{ok,1} ที่ k=2 ดังสมการที่ (3.18) ในสเต็ปช่วงย่อยที่ 2 ก็จะสามารถ คำนวณหาก่ากำลังไฟฟ้า P_{o2} ทางด้านเอซีเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ได้ดังสมการที่ (3.19) และ สมการที่ (3.20)

$$\dot{h}_{o2,1} = \frac{R_{eq}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{2}\left(\frac{4}{\pi}V_{o,p}\sin\left[\frac{3\pi}{m_{f}}\right]\right)}{L_{eq}^{2}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{4} - 2L_{eq}C_{eq}\omega_{s}^{2} + 1 + R_{eq}^{2}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{2}}\cos(\omega_{s}t)$$
(3.17)
+
$$\frac{C_{eq}\omega_{s}\left(\frac{4}{\pi}V_{o,p}\sin\left[\frac{3\pi}{m_{f}}\right]\right)(L_{eq}C_{eq}\omega_{s}^{2} - 1)}{L_{eq}^{2}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{4} - 2L_{eq}C_{eq}\omega_{s}^{2} + 1 + R_{eq}^{2}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{2}}\sin(\omega_{s}t)$$

เมื่อนำกระแสฟันดาเมนทอล i_{ok,1} ที่ k=2 มาพิจารณาร่วมกับคลื่นแรงคันฟันดาเมนทอล v_{ok,1} ที่ k=2 ดังสมการที่ (3.18)

$$v_{o2,1} = \left(\frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{3\pi}{m_f}\right]\right) \sin\left(\omega_s t\right)$$
(3.18)

สามารถนำไปสู่การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า *P_{o2}* ทางด้านเอซีเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่ k=2 ใด้ดังสมการที่ (3.19) และสมการที่ (3.20)

$$P_{o2} = \left(\frac{V_{o2,1}I_{o2,1}}{2}\right)\cos\beta \tag{3.19}$$

$$P_{o2} = \left(\frac{1}{2} \left(\frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{3\pi}{m_{f}}\right]\right) \left[\left(\frac{R_{eq} C_{eq}^{2} \omega_{s}^{2} \left(\frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{3\pi}{m_{f}}\right]\right)}{L_{eq}^{2} C_{eq}^{2} \omega_{s}^{4} - 2L_{eq} C_{eq} \omega_{s}^{2} + R_{eq}^{2} C_{eq}^{2} \omega_{s}^{2} + 1}\right)^{2}$$
(3.20)

$$+ \left(\frac{C_{eq}\omega_{s}(L_{eq}C_{eq}\omega_{s}^{2}-1)\left(\frac{4}{\pi}V_{o,p}\sin\left[\frac{3\pi}{m_{f}}\right]\right)}{L_{eq}^{2}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{4}-2L_{eq}C_{eq}\omega_{s}^{2}+R_{eq}^{2}C_{eq}^{2}\omega_{s}^{2}+1}\right)^{2}\right]^{\frac{1}{2}}\cos\beta$$

ดังนั้นเมื่อนำสมการคลื่นกระแสฟันดาเมนทอล i_{ok,1} และแรงดันฟันดาเมนทอล v_{ok,1} ทางด้าน เอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ที่ k ใดๆ มาคำนวณร่วมกัน ดังรูปที่ 3.24 ก็จะสามารถคำนวณหาค่า กำลังไฟฟ้าทางด้านเอซีเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ ได้ดังสมการที่ (3.21) และสมการที่ (3.22)



ร**ูปที่ 3.24** อธิบายการคำนวณวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้า P_o ทางค้านเอซีเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ ในสเต็ปช่วงย่อยใดๆ

$$P_{ok} = \frac{1}{k} \sum_{k=1,2,3,\dots}^{m_f} \left(\frac{V_{ok,1} I_{ok,1}}{2} \right) \cos \beta$$
(3.21)

$$P_{ok} = \frac{1}{2k} \left(\sum_{k=1,2,3,\dots}^{m_{f}} \left(\frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{2\pi k - \pi}{m_{f}}\right] \right) \left[\left(\frac{R_{eq} C_{eq}^{2} \omega_{s}^{2} \left(\frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin\left[\frac{2\pi k - \pi}{m_{f}}\right]\right)}{L_{eq}^{2} C_{eq}^{2} \omega_{s}^{4} - 2L_{eq} C_{eq} \omega_{s}^{2} + R_{eq}^{2} C_{eq}^{2} \omega_{s}^{2} + 1} \right)^{2} \right]$$
(3.22)

$$+ \left(\frac{C_{eq}\omega_{s} (L_{eq}C_{eq}\omega_{s}^{2} - 1) \left(\frac{4}{\pi} V_{o,p} \sin \left[\frac{2\pi k - \pi}{m_{f}} \right] \right)}{L_{eq}^{2} C_{eq}^{2} \omega_{s}^{4} - 2L_{eq} C_{eq} \omega_{s}^{2} + R_{eq}^{2} C_{eq}^{2} \omega_{s}^{2} + 1} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}} \cos \beta$$

3.6 สรุป

 ได้นำเสนอวิธีการ การปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟ็คเตอร์ทางด้านแหล่งง่ายการไฟฟ้า 50-Hz ของ อุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงให้มีค่าสูงขึ้น

 ได้นำเสนอวิธีการกำนวณสมการคลื่นแรงคันทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่น แรงคันดีซีเร็กติฟายที่มีการป้อนเข้าทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์

 ได้นำเสนอวิธีการคำนวณคลื่นแรงดันและกระแสฟันดาเมนทอลทางด้านเอาท์พุทของ อินเวอร์เตอร์ในแต่ละช่วงย่อยของแรงดันดีซีเร็กติฟายที่มีการป้อนเข้าทางด้านอินพุทของ อินเวอร์เตอร์

 4) ได้นำเสนอวิธีการกำนวณและวัคก่ากำลังไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ในกรณีที่ กลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทมีการเปลี่ยนแปลงตามระดับแรงดันดีซีเร็กติฟายทางด้านอินพุท ของอินเวอร์เตอร์