

## บทที่ 5

### ผลการจำลองสนามแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์เฉียง

#### 5.1 บทนำ

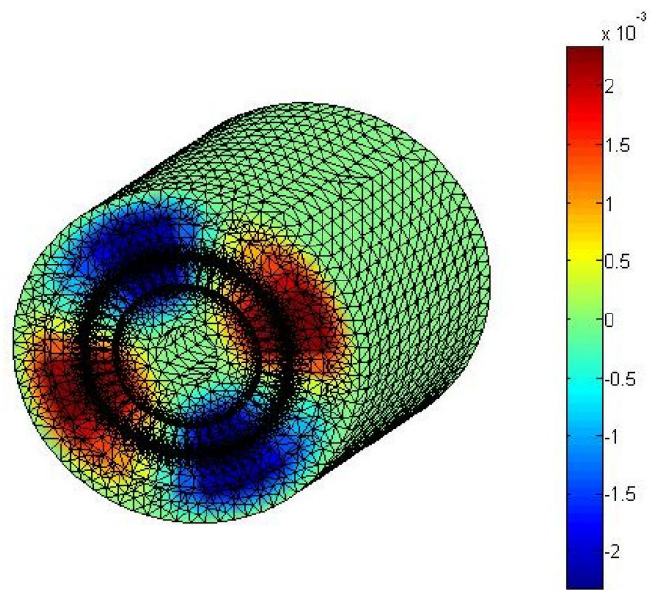
ในบทที่ผ่านมา มาของงานวิจัยนี้ ได้อธิบายถึงวิธีการคำนวณสนามแม่เหล็กและการคำนวณการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ สำหรับในบทที่ 5 นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองผลการคำนวณสนามแม่เหล็กและการคำนวณการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากบทที่ผ่านมาพร้อมทั้งอภิปรายผลการจำลองตลอดจนเปรียบเทียบผลการคำนวณการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรงและร่องโรเตอร์แบบเฉียง สำหรับงานวิจัยนี้ได้แบ่งการพิจารณาลักษณะร่องโรเตอร์ออกเป็น 3 แบบได้แก่ 1) ร่องโรเตอร์แบบร่องตรง, 2) ร่องโรเตอร์แบบเฉียงครึ่งร่อง, และ 3) ร่องโรเตอร์แบบเฉียงเต็มร่อง

#### 5.2 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กและอภิปรายผล

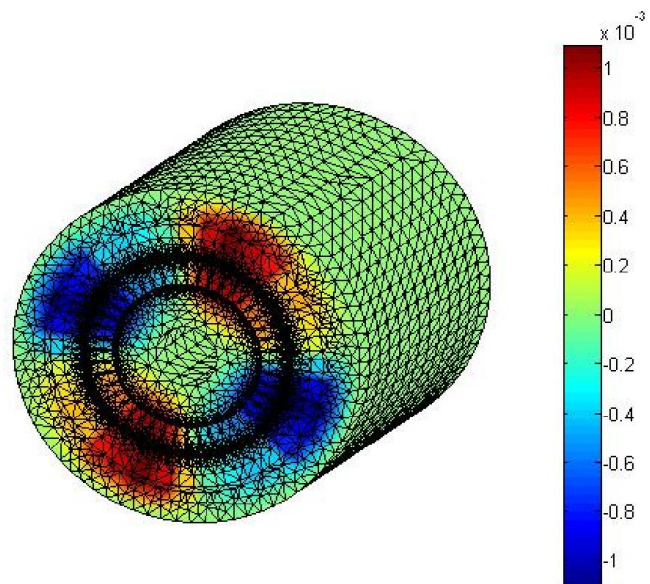
การคำนวณการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น จะต้องคำนวณค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กระจายตัวตามปริมาตรของมอเตอร์ก่อน จากนั้นจึงคำนวณค่าสนามแม่เหล็กซึ่งถือว่าเป็นอิทธิพลหลักที่ก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนของมอเตอร์ ซึ่งในหัวข้อต่อไปนี้จะได้นำเสนอผลการคำนวณค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กพร้อมทั้งอภิปรายผลการจำลอง

##### 5.2.1 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรง

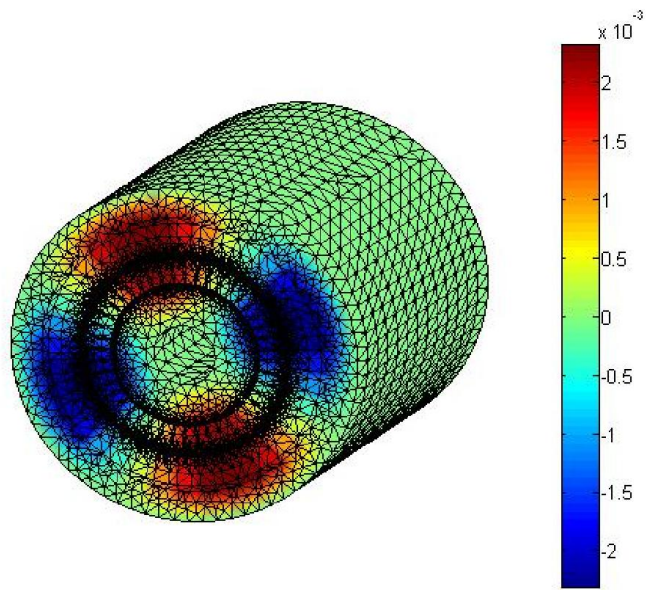
การจำลองผลการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กตลอดปริมาตรของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่ ด้วยมุมต่างๆ ที่โรเตอร์หมุนใน 98.1816 องศา ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.1 - 5.4 แสดงถึงการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเริ่มตั้งแต่มุม 0 องศา ถึง 98.1816 องศา โดยแต่ละรูปโรเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาต่างกันด้วยมุมทีละ 32.7272 องศา



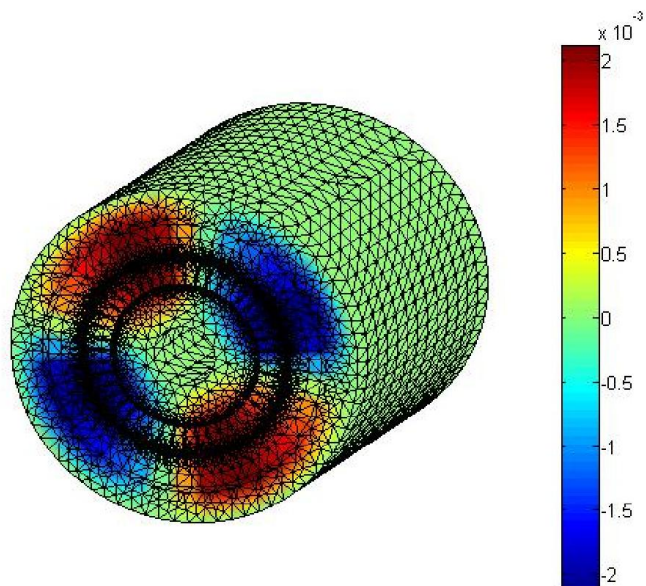
รูปที่ 5.1 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ( $Wb/m$ ) เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรง  
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 0 องศา



รูปที่ 5.2 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ( $Wb/m$ ) เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรง  
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 32.7272 องศา



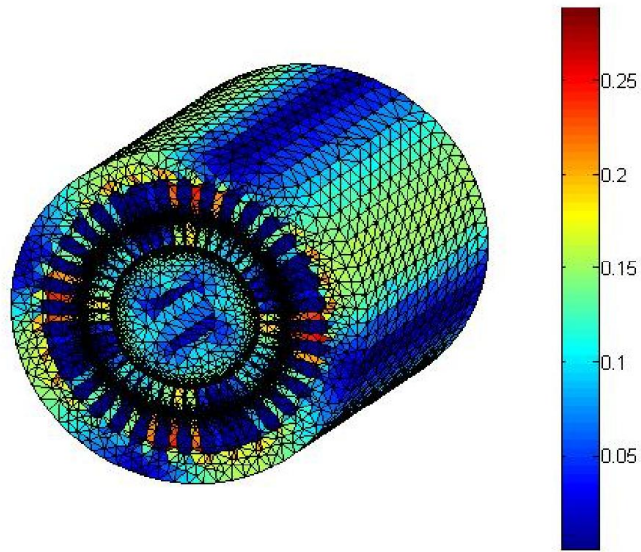
รูปที่ 5.3 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ( $Wb/m$ ) เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรง  
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 65.4544 องศา



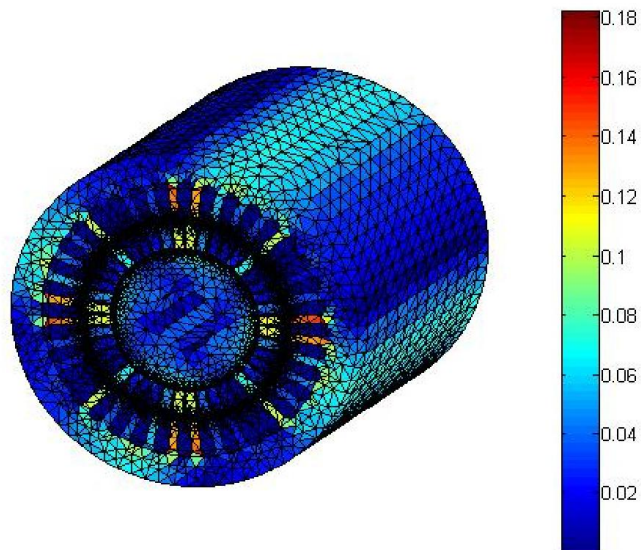
รูปที่ 5.4 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ( $Wb/m$ ) เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรง  
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 98.1816 องศา

จากรูปที่ 5.1 - 5.4 จะสังเกตเห็นว่า ทางเดินของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อพิจารณามอเตอร์หมุนในสถานะอยู่ตัวและมีโหลดเต็มพิกัด ปรากฏให้เห็นถึงจำนวนขั้วแม่เหล็ก  $N$  (สีแดง) และ  $S$  (สีน้ำเงิน) สลับกันไปจำนวน 4 ขั้ว เท่ากับจำนวนขั้วของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลอย่างเด่นชัด ซึ่งพิจารณาควบคู่กับค่าแถบสีทางด้านขวามือที่มีทั้งค่าบวกและค่าลบ โดยค่าบวกที่มีขนาดสูงสุดจะแทนได้ด้วยสีแดงเข้ม และค่าลบที่มีขนาดสูงสุดจะแทนด้วยสีน้ำเงินเข้ม ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 5.1 - 5.4 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กแบ่งออกเป็น 2 แถบสีหลักๆ คือ แดงและน้ำเงินสลับกันไป 4 กลุ่ม ซึ่งจำนวนกลุ่มนี้เปรียบเสมือนจำนวนขั้วแม่เหล็ก โดยกลุ่มสีแดงหมายถึงขั้ว  $N$  ซึ่งมีทิศทางของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก  $A$  มีทิศพุ่งเข้าหาหน้ากระดาษ ส่วนกลุ่มสีน้ำเงินหมายถึงขั้ว  $S$  ซึ่งมีทิศทางของ  $A$  พุ่งออกจากหน้ากระดาษ โดยศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะเริ่มเข้าทางเดินเมื่อโรเตอร์หมุนผ่านไปประมาณ  $180^\circ$  (ในกรณีที่พิจารณาในสถานะไร้โหลดจะมีค่าเท่ากับ  $180^\circ$  พอดี (Ishibashi, Noda, and Mochizuki, 1998)) และศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะแสดงพฤติกรรมที่เรียกว่าสนามแม่เหล็กหมุน โดยมีทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกาไปในทิศทางเดียวกับการหมุนของโรเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล

เมื่อทราบค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กก็สามารถนำไปคำนวณค่าสนามแม่เหล็กได้ การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์นั้นสามารถกระทำได้ด้วยการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก รูปที่ 5.5 - 5.8 แสดงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ตามปริมาตรของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อโรเตอร์หมุนไปจากมุม 0 องศา ถึง 98.1816 องศา โดยโรเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาด้วยมุมต่างกัน 32.7272 องศา

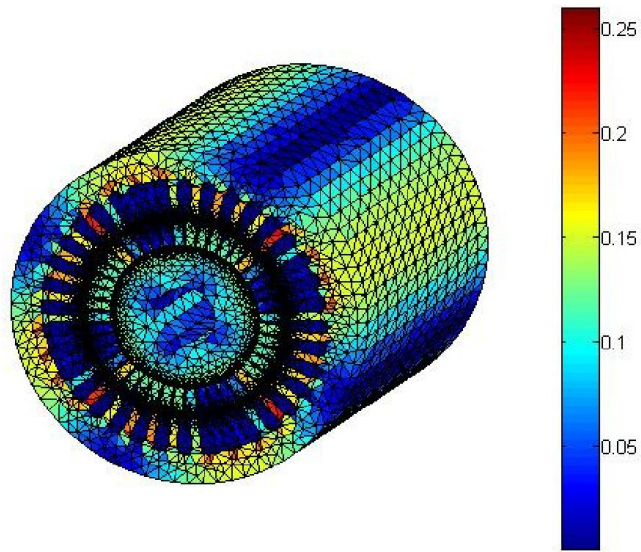


รูปที่ 5.5 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก ( $T$ ) เมื่อพิจารณาช่องโรเตอร์แบบร่องตรง  
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 0 องศา

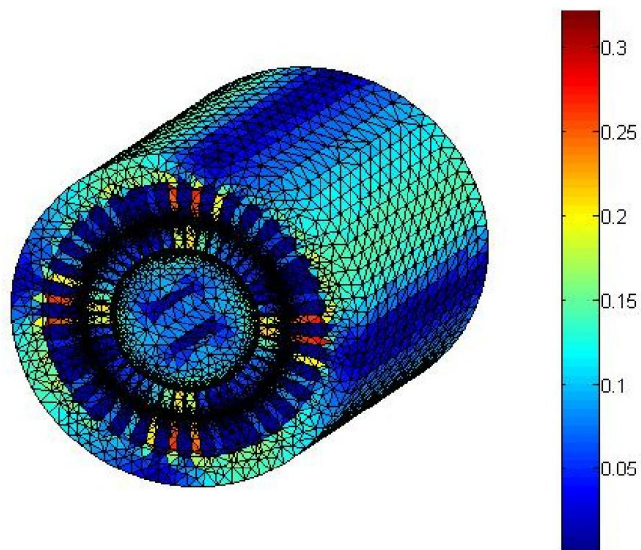


รูปที่ 5.6 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก ( $T$ ) เมื่อพิจารณาช่องโรเตอร์แบบร่องตรง  
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 32.7272 องศา





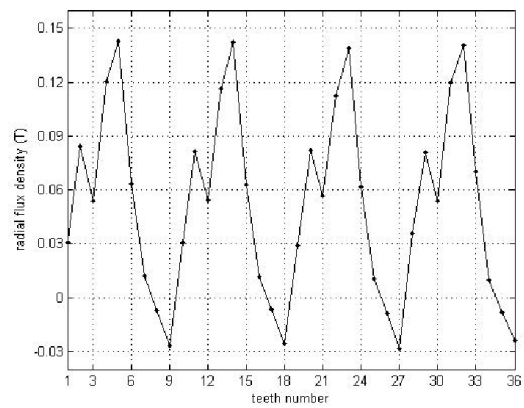
รูปที่ 5.7 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก ( $T$ ) เมื่อพิจารณาช่องโรเตอร์แบบร่องตรง  
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 65.4544 องศา



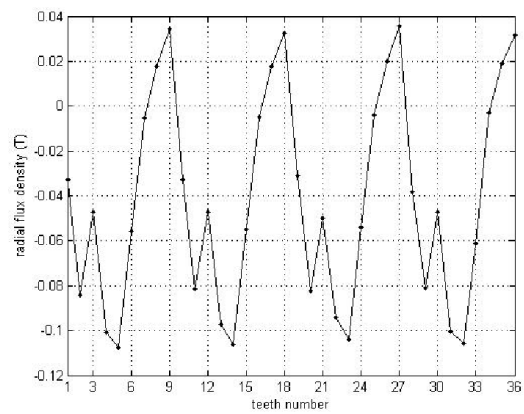
รูปที่ 5.8 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก ( $T$ ) เมื่อพิจารณาช่องโรเตอร์แบบร่องตรง  
เมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 98.1816 องศา

ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่ได้จากการจำลองผลในแต่ละจุดต่อที่กระจายบนพื้นที่หน้าตัดตามแนวแกน  $z$  ของมอเตอร์ ( $A_z$ ) จะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในแนวรัศมี ( $B_r$ ) ที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ตรงส่วนของฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ทั้ง 36 ซี่ ที่มีมุมการหมุนของโรเตอร์แปรเปลี่ยนไป โดยรูปที่ 5.9 เป็นการแสดงค่า  $B_r$  ที่กระทำตรงฟันของสเตเตอร์ในแต่ละซี่ ซึ่งเป็นการพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรงเมื่อพิจารณาโรเตอร์หมุนไป  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  และ  $180^\circ$  (ซี่ที่ 1 คือตำแหน่ง  $0^\circ$  เทียบกับแกน  $x+$  พอดี และซี่ถัดไปจะวางตัวเป็นลำดับในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา) จากรูปที่ 5.9 จะสังเกตเห็นว่า รูปกราฟของ  $B_r$  จะมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์แอมพลิจูดสูงสุดประมาณ 0.14 tesla ที่มีคาบเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนซี่ทั้งหมด โดยกราฟ  $B_r$  จะมีลักษณะเหมือนเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนผ่านไปประมาณ  $180^\circ$  และเมื่อพิจารณารูปกราฟของ  $B_r$  เมื่อโรเตอร์หมุนทำมุม  $0^\circ$  ดังรูปที่ 5.9(ก) เทียบกับรูปของการกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเมื่อโรเตอร์หมุนทำมุม  $0^\circ$  เช่นกัน ดังรูปที่ 5.1 จะสังเกตเห็นว่าค่า  $B_r$  ในรูปที่ 5.9(ก) จะมีขนาดสูงสุด ณ ตำแหน่งฟันของสเตเตอร์ซี่ที่ 5, 14, 23 และ 32 และจะมีค่าเป็นศูนย์ ณ ตำแหน่งฟันของสเตเตอร์ซี่ที่ 8, 17, 26 และ 35 โดยระยะห่างในแต่ละซี่ที่ปรากฏจะมีค่าเป็น 9 ซึ่งเท่ากับ 1 พิตช์ขั้วแม่เหล็กพอดิ (1 pole pitch) ซึ่งจะสอดคล้องกับรูปที่ 5.1 โดยศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก  $A$  จะมีค่าเป็นศูนย์ ณ ซี่ที่ 5, 14, 23 และ 32 และจะมีขนาดสูงสุด ณ ซี่ที่ 8, 17, 26 และ 35 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากค่าสนามแม่เหล็ก  $B$  ได้จากการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก  $A$  ซึ่งรูปที่ 5.9(ข) และ 5.9(ค) สามารถพิจารณาเทียบได้ในทำนองเดียวกัน

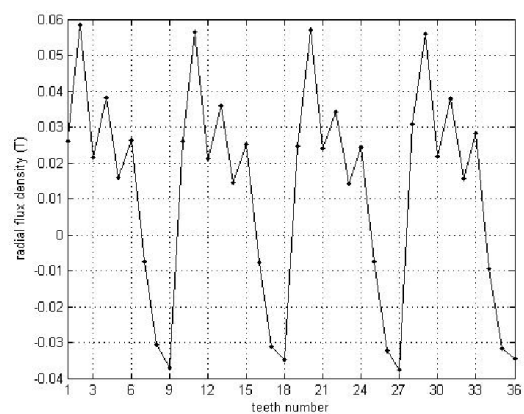
เมื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กแล้ว จากนั้นจึงใช้สมการความเค้นของแมกซ์เวลล์หาค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวรัศมี ( $F_r$ ) ที่กระทำกับช่องอากาศตรงฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ ซึ่ง  $F_r \propto B_r^2$  โดยรูปที่ 5.10 เป็นการแสดงค่า  $F_r$  เทียบกับเวลา โดยพิจารณา  $F_r$  กระทำกับช่องอากาศตรงส่วนของฟันสเตเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนครบ 1 รอบ เฉพาะในซี่ที่ 1 ถึงซี่ที่ 9 จากทั้งหมด 36 ซี่ เนื่องจากผลของ  $F_r$  จะเริ่มซ้ำเป็นคาบในทุกๆ 9 ซี่ ซึ่งสอดคล้องกับระยะ 1 พิตช์ขั้วแม่เหล็ก ดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้น



(ก)



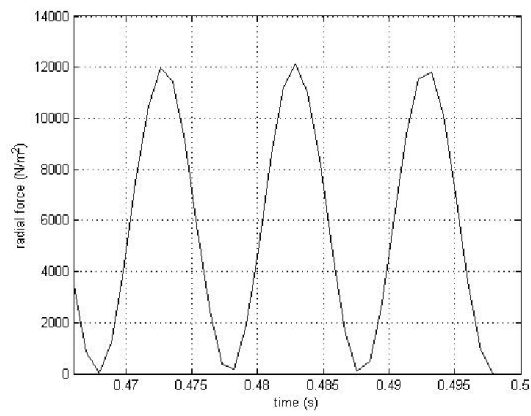
(ข)



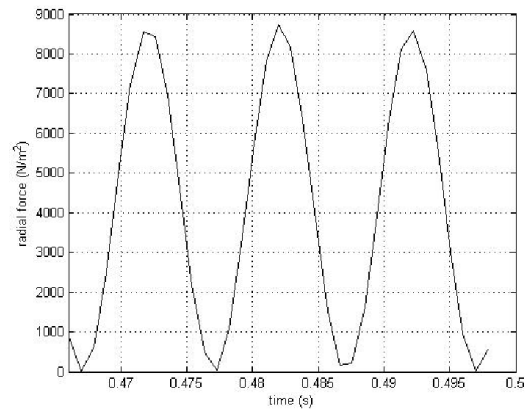
(ค)

รูปที่ 5.9 สนามแม่เหล็กตามแนวรัศมีที่กระทำกับฟันสเตเตอร์เมื่อพิจารณา  
ร่องโรเตอร์แบบร่องตรงเมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก)  $0^\circ$ , (ข)  $90^\circ$  และ (ค)  $180^\circ$

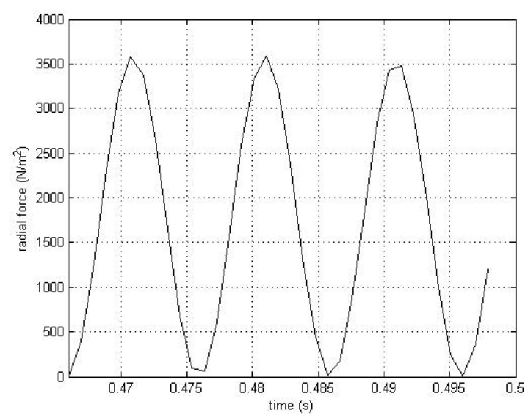




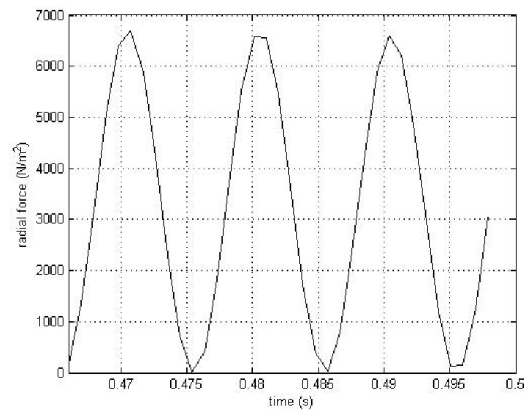
(n)



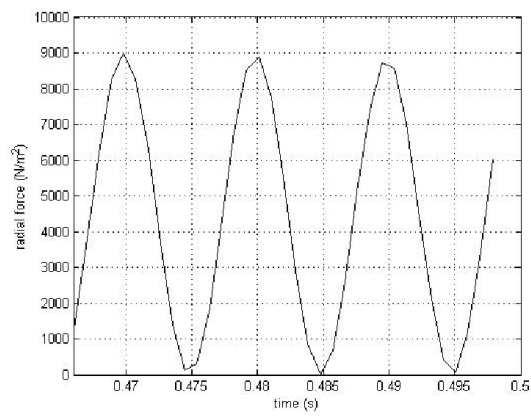
(ñ)



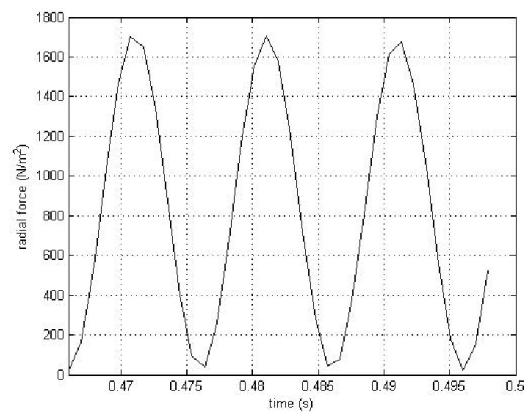
(ñ)



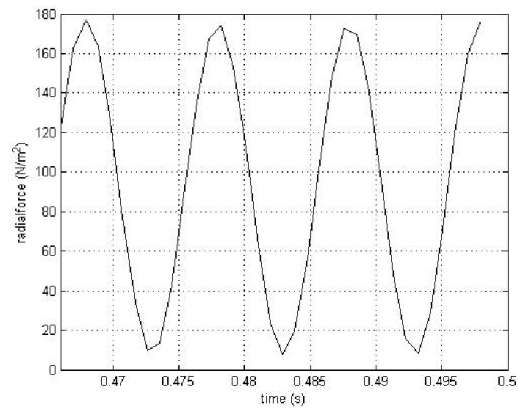
(a)



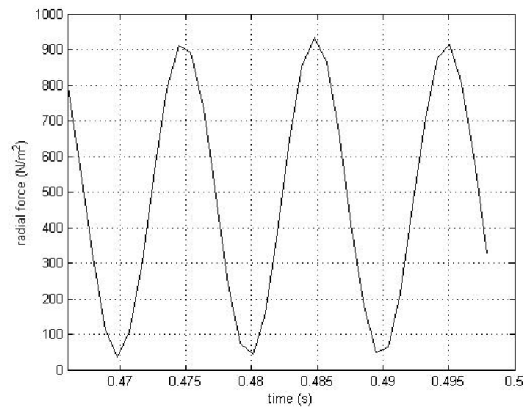
(b)



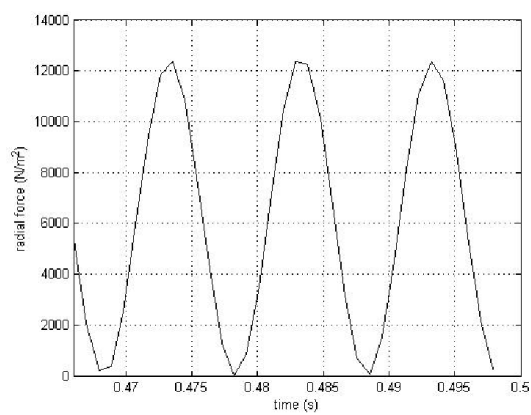
(c)



(ข)



(ค)



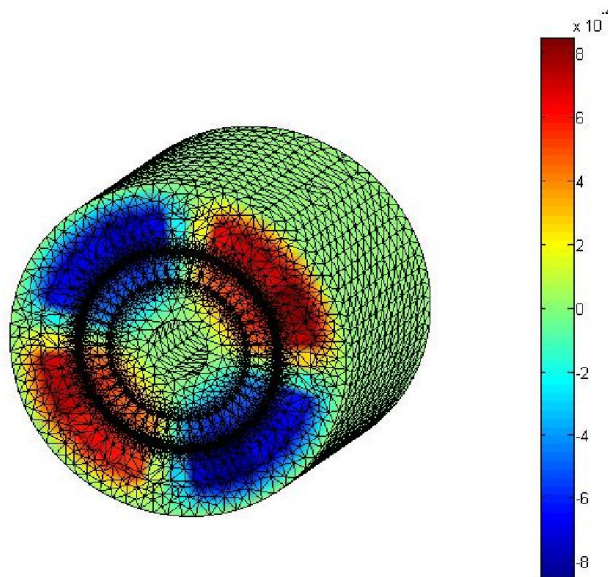
(ง)

รูปที่ 5.10 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับฟันสเตเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรง (ก) ซี่ที่ 1, (ข) ซี่ที่ 2, (ค) ซี่ที่ 3, (ง) ซี่ที่ 4, (จ) ซี่ที่ 5, (ฉ) ซี่ที่ 6, (ช) ซี่ที่ 7, (ฌ) ซี่ที่ 8, (ณ) ซี่ที่ 9

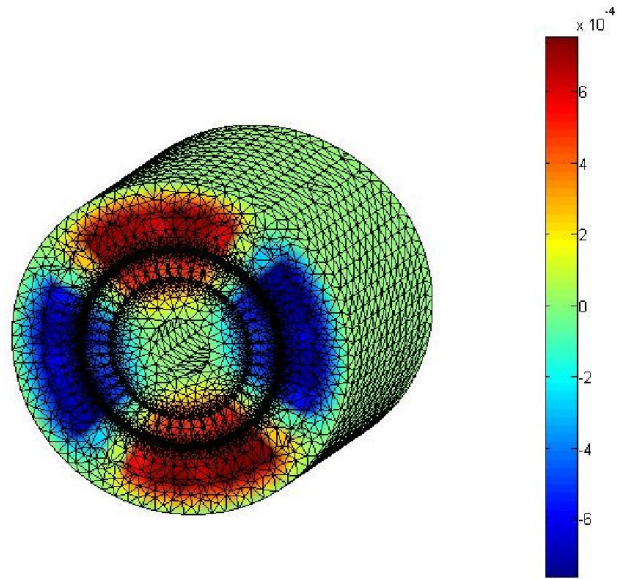
จากรูปที่ 5.10 จะสังเกตเห็นว่ารูปกราฟของ  $F_r$  เทียบกับเวลาจะมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์ครึ่งคลื่นบวก ที่มีขนาดแตกต่างกันไปตามแรงที่มากระทำกับพื้นสเตเตอร์ในแต่ละซี่ และมีคาบประมาณ 0.01 วินาที หรือ 100 Hz (ในกรณีที่พิจารณาในสภาวะไร้อะไหล่จะมีค่าเท่ากับ 0.01 วินาทีพอดี ซึ่ง  $F_r$  จะมีความถี่เป็น 2 เท่าของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Ishibashi, Noda, and Mochizuki, 1998)) โดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับพื้นสเตเตอร์ในซี่ที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 5.10(ก) จะมีค่าทั้งขนาดและเฟสเท่ากับแรงที่กระทำในซี่ที่ 10, 19 และ 28 ทุกประการ ซึ่งสอดคล้องกับระยะ 1 พิตช์ ขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล และแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับพื้นสเตเตอร์ในซี่อื่นๆ ก็มีลักษณะเป็นแบบนี้เช่นกัน

### 5.2.2 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบเฉียงครึ่งร่อง

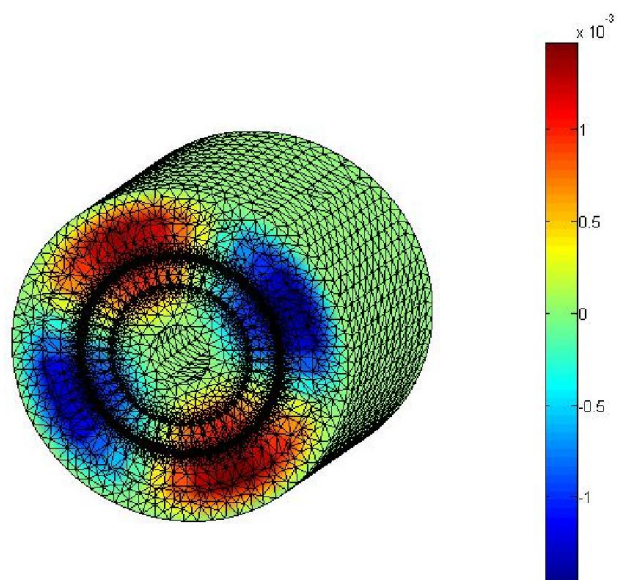
การจำลองผลการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กตลอดปริมาตรของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่ ด้วยมุมต่างๆ ที่โรเตอร์หมุนใน 98.1816 องศา ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.11 - 5.14 แสดงถึงการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเริ่มตั้งแต่มุม 0 องศา ถึง 98.1816 องศา โดยแต่ละรูปโรเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาต่างกันด้วยมุมทีละ 32.7272 องศา



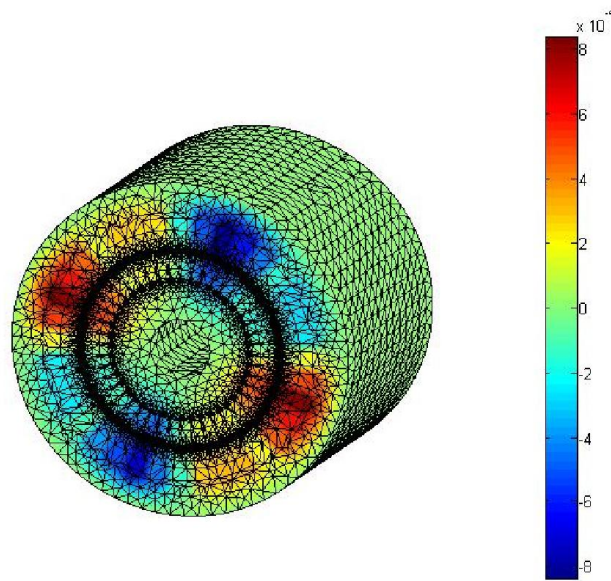
รูปที่ 5.11 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ( $Wb/m$ ) เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบเฉียงครึ่งร่องเมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 0 องศา



รูปที่ 5.12 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ( $Wb/m$ ) เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์  
แบบเฉียงครึ่งร่องเมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 32.7272 องศา



รูปที่ 5.13 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ( $Wb/m$ ) เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์  
แบบเฉียงครึ่งร่องเมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 65.4544 องศา

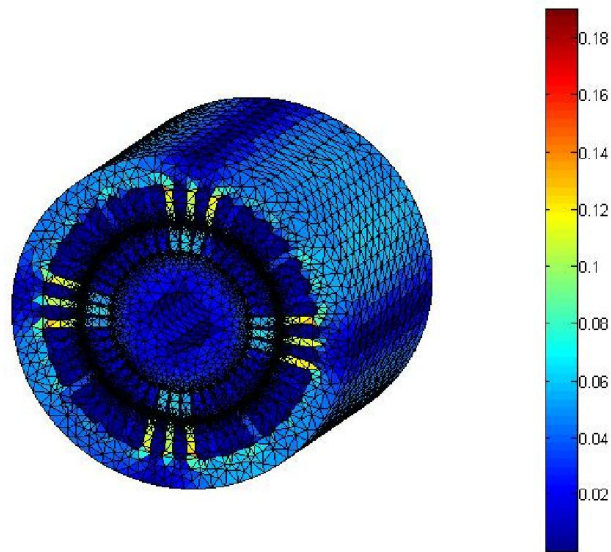


รูปที่ 5.14 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ( $Wb/m$ ) เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์  
แบบเฉียงครึ่งร่องเมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 98.1816 องศา

จากรูปที่ 5.11 - 5.14 จะสังเกตเห็นว่า ทางเดินของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อพิจารณามอเตอร์หมุนในสถานะอยู่ตัวและมีโหลดเต็มพิกัดปรากฏให้เห็นถึงจำนวนขั้วแม่เหล็ก N (สีแดง) และ S (สีน้ำเงิน) สลับกันไปจำนวน 4 ขั้ว เท่ากับจำนวนขั้วของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลองอย่างเด่นชัด ซึ่งพิจารณาควบคู่กับค่าแถบสีทางด้านขวามือที่มีทั้งค่าบวกและค่าลบ โดยค่าบวกที่มีขนาดสูงสุดจะแทนได้ด้วยสีแดงเข้ม และค่าลบที่มีขนาดสูงสุดจะแทนด้วยสีน้ำเงินเข้ม ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 5.11 - 5.14 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กแบ่งออกเป็น 2 แถบสีหลักๆ คือ แดงและน้ำเงินสลับกันไป 4 กลุ่ม ซึ่งจำนวนกลุ่มนี้เปรียบเสมือนจำนวนขั้วแม่เหล็ก โดยกลุ่มสีแดงหมายถึงขั้ว N ซึ่งมีทิศทางของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A มีทิศพุ่งเข้าหาหน้ากระดาด ส่วนกลุ่มสีน้ำเงินหมายถึงขั้ว S ซึ่งมีทิศทางของ A พุ่งออกจากหน้ากระดาด โดยศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะเริ่มซ้ำทางเดินเมื่อโรเตอร์หมุนผ่านไปประมาณ  $180^\circ$  (ในกรณีที่พิจารณาในสภาวะไร้โหลดจะมีค่าเท่ากับ  $180^\circ$  พอดี (Ishibashi, Noda, and Mochizuki, 1998)) และศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะแสดงพฤติกรรมที่เรียกว่าสนามแม่เหล็กหมุน โดยมีทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกาไปในทิศทางเดียวกับการหมุนของโรเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

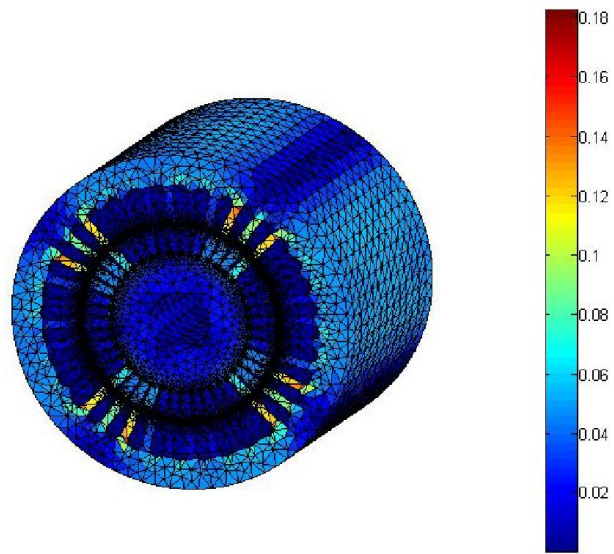
ผล

เมื่อทราบค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กก็สามารถนำไปคำนวณค่าสนามแม่เหล็กได้ การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์นั้นสามารถกระทำได้ด้วยการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก รูปที่ 5.15 - 5.18 แสดงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ตามปริมาตรของมอเตอร์นี้ขั้วนำเมื่อ โรเตอร์หมุนไปจากมุม 0 องศา ถึงมุม 98.1816 องศา โดยโรเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ด้วยมุมต่างกัน 32.7272 องศา

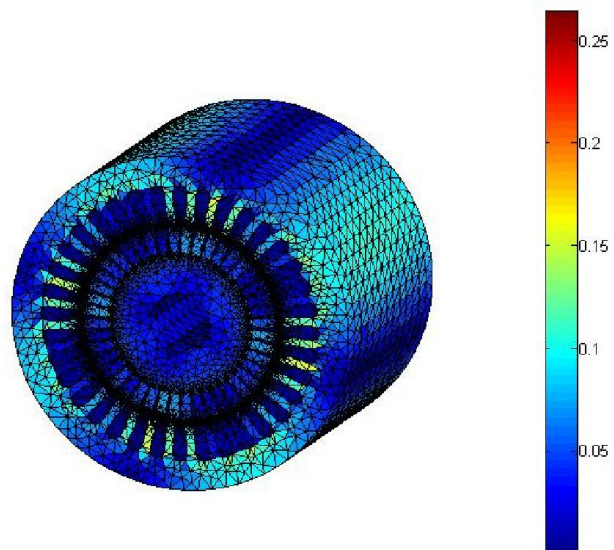


รูปที่ 5.15 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ( $T$ ) เมื่อพิจารณาช่องโรเตอร์  
แบบเฉียงครึ่งร่องเมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 0 องศา

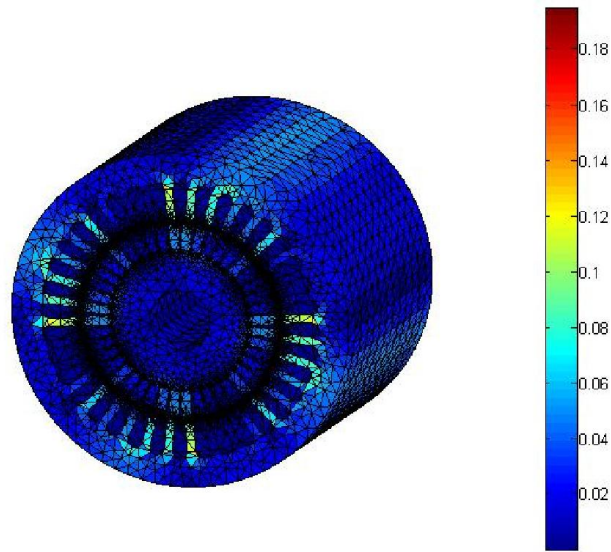




รูปที่ 5.16 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก ( $T$ ) เมื่อพิจารณาช่องโรเตอร์  
แบบเฉียงครึ่งช่องเมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 32.7272 องศา



รูปที่ 5.17 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก ( $T$ ) เมื่อพิจารณาช่องโรเตอร์  
แบบเฉียงครึ่งช่องเมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 65.4544 องศา

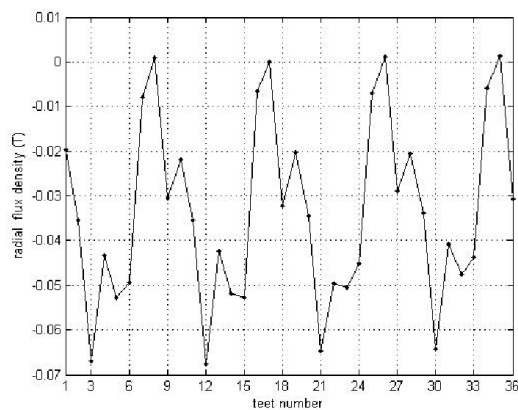


รูปที่ 5.18 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก ( $T$ ) เมื่อพิจารณาช่องโรเตอร์  
แบบเฉียงครึ่งช่องเมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 98.1816 องศา

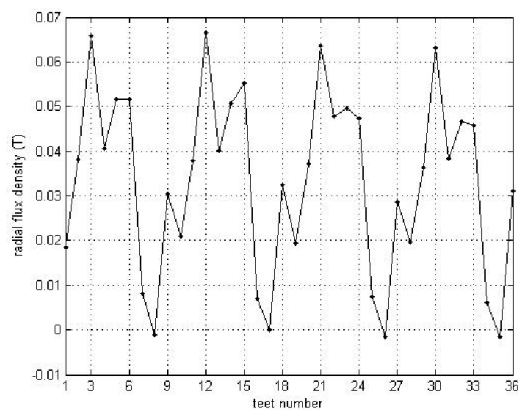
ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่ได้จากการจำลองผลในแต่ละจุดต่อที่กระจายบนพื้นที่หน้าตัดตามแนวแกน  $z$  ของมอเตอร์ ( $A_z$ ) จะนำไปใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในแนวรัศมี ( $B_r$ ) ที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ตรงส่วนของพื้นสเตเตอร์ในแต่ละซี่ทั้ง 36 ซี่ ที่มีมุมการหมุนของโรเตอร์แปรเปลี่ยนไป โดยรูปที่ 5.19 เป็นการแสดงค่า  $B_r$  ที่กระทำตรงพื้นของสเตเตอร์ในแต่ละซี่ ซึ่งเป็นการพิจารณาช่องโรเตอร์แบบเฉียงครึ่งช่องเมื่อพิจารณาโรเตอร์หมุนไป  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  และ  $180^\circ$  (ซี่ที่ 1 คือตำแหน่ง  $0^\circ$  เทียบกับแกน  $x+$  พอดี และซี่ถัดไปจะวางตัวเป็นลำดับในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา) จากรูปที่ 5.19 จะสังเกตเห็นว่า รูปกราฟของ  $B_r$  จะมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์แอมพลิจูดสูงสุดประมาณ 0.07 tesla ที่มีคาบเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนซี่ทั้งหมด โดยกราฟ  $B_r$  จะมีลักษณะเหมือนเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนผ่านไปประมาณ  $180^\circ$  และเมื่อพิจารณารูปกราฟของ  $B_r$  เมื่อโรเตอร์หมุนทำมุม  $0^\circ$  ดังรูปที่ 5.19(ก) เทียบกับรูปของการกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเมื่อโรเตอร์หมุนทำมุม  $0^\circ$  เช่นกัน ดังรูปที่ 5.11 จะสังเกตเห็นว่าค่า  $B_r$  ในรูปที่ 5.19(ก) จะมีขนาดสูงสุด ณ ตำแหน่งพื้นของสเตเตอร์ซี่ที่ 3, 12, 21 และ 30 และจะมีค่าเป็นศูนย์ ณ ตำแหน่งพื้นของสเตเตอร์ซี่ที่ 8, 17, 26 และ 35 โดยระยะห่างในแต่ละซี่ที่ปรากฏจะมีค่าเป็น 9 ซึ่งเท่ากับ 1 พิตช์ ขั้วแม่เหล็กพอดิ (1 pole pitch) ซึ่งจะสอดคล้องกับรูปที่ 5.11 โดยศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก  $A$  จะมีค่าเป็นศูนย์ ณ ซี่ที่ 3, 12, 21 และ 30 และจะมีขนาดสูงสุด ณ ซี่ที่ 8, 17, 26 และ 35 ทั้งนี้เป็นผล

เนื่องมาจากค่าสนามแม่เหล็ก B ได้จากการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A ซึ่งรูปที่ 5.19(ข) และ 5.19(ค) สามารถพิจารณาเทียบได้ในทำนองเดียวกัน จะพบว่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรง

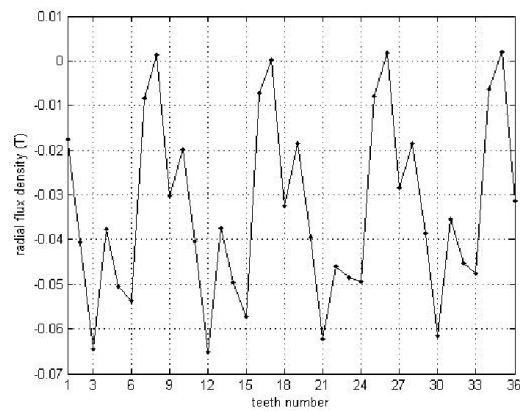
เมื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กแล้ว จากนั้นจึงใช้สมการความเค้นของแมกซ์เวลล์หาค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวนอน ( $F_r$ ) ที่กระทำกับช่องอากาศตรงพื้นสเตเตอร์ในแต่ละซี่ ซึ่ง  $F_r \propto B_r^2$  โดยรูปที่ 5.20 เป็นการแสดงค่า  $F_r$  เทียบกับเวลา โดยพิจารณา  $F_r$  กระทำกับช่องอากาศตรงส่วนของพื้นสเตเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนครบ 1 รอบ เฉพาะในซี่ที่ 1 ถึงซี่ที่ 9 จากทั้งหมด 36 ซี่ เนื่องจากผลของ  $F_r$  จะเริ่มซ้ำเป็นคาบในทุกๆ 9 ซี่ ซึ่งสอดคล้องกับระยะ 1 พิตช์ขั้วแม่เหล็ก ดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้น จะพบว่าแรงแม่เหล็กในแนวนอนจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรง



(ก)

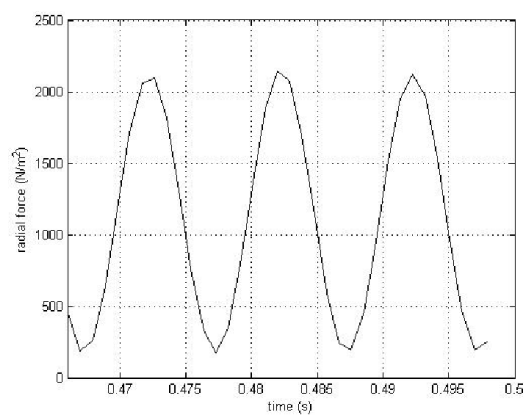


(ข)

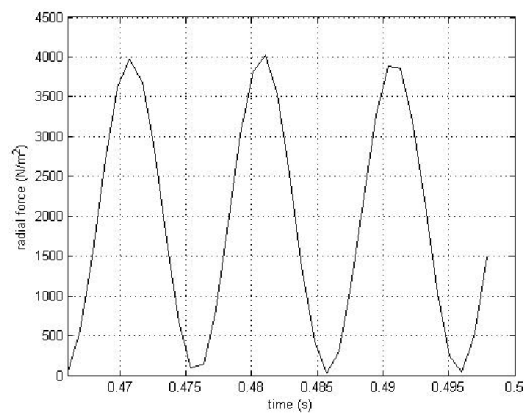


(ค)

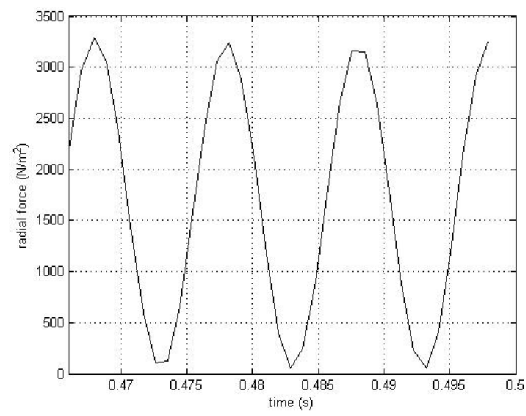
รูปที่ 5.19 สนามแม่เหล็กตามแนวรัศมีที่กระทำกับฟันสเตเตอร์เมื่อพิจารณา  
ร่องโรเตอร์แบบเฉียงครึ่งร่องเมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก)  $0^\circ$ , (ข)  $90^\circ$  และ (ค)  $180^\circ$



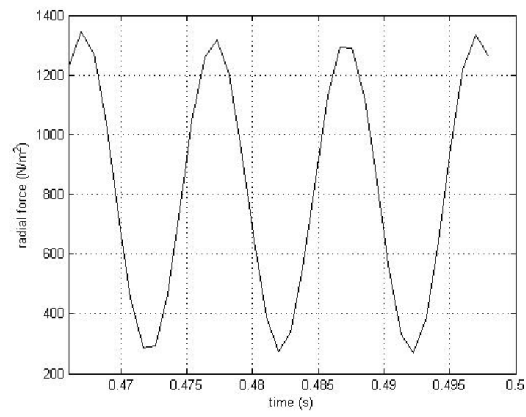
(ก)



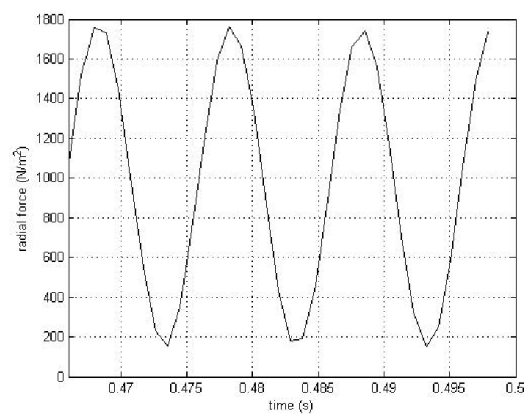
(ข)



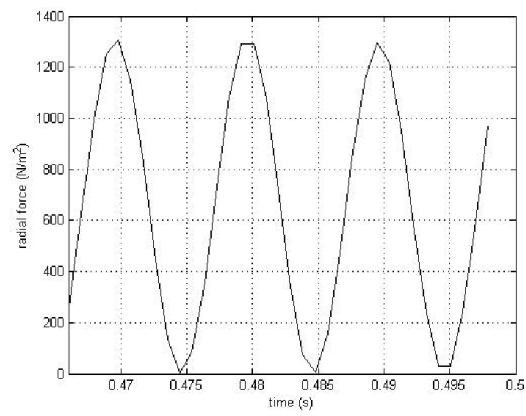
(ก)



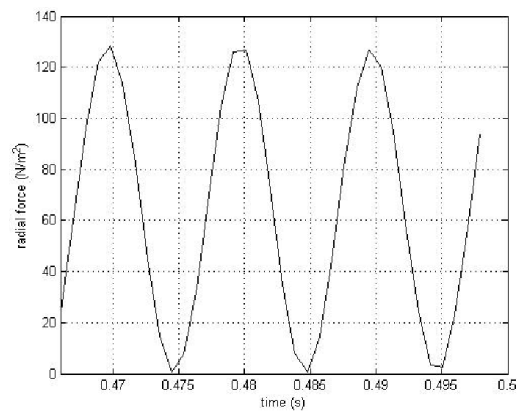
(จ)



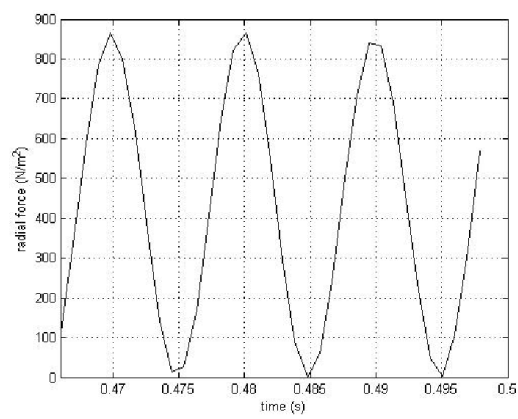
(ฉ)



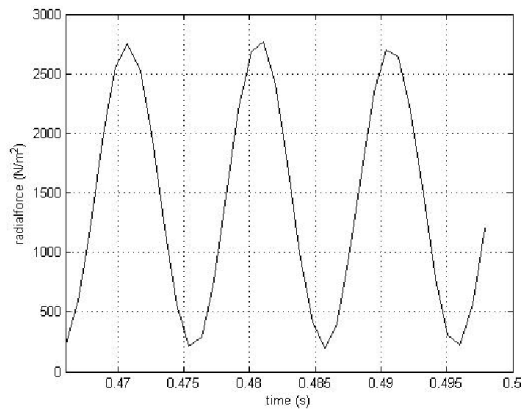
(a)



(b)



(c)



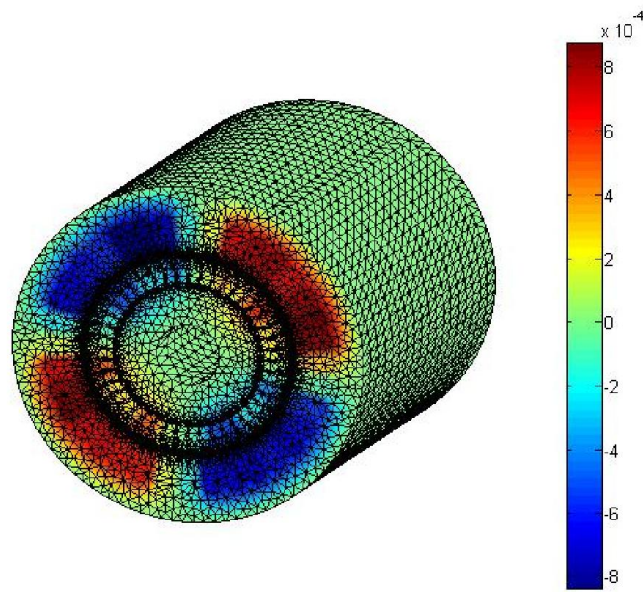
(ณ)

รูปที่ 5.20 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับพื้นสเตเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบเฉียงครึ่งร่อง (ก) ซี่ที่ 1, (ข) ซี่ที่ 2, (ค) ซี่ที่ 3, (ง) ซี่ที่ 4, (จ) ซี่ที่ 5, (ฉ) ซี่ที่ 6, (ช) ซี่ที่ 7, (ซ) ซี่ที่ 8, (ณ) ซี่ที่ 9

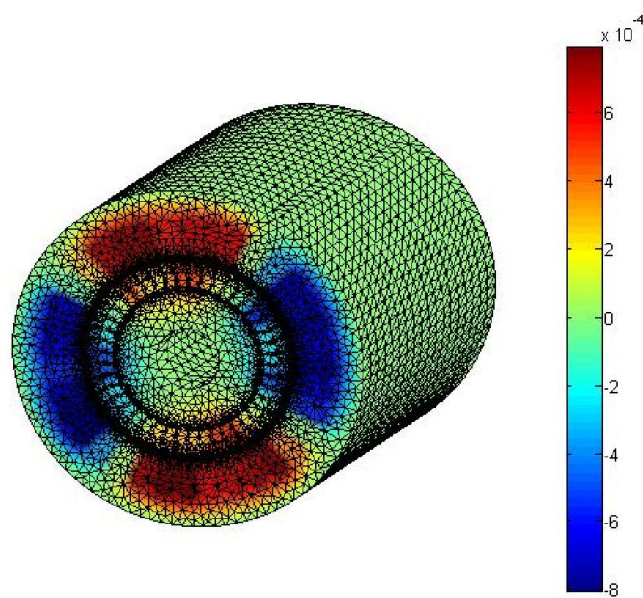
### 5.2.3 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบเฉียงเต็มร่อง

การจำลองผลการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กตลอดปริมาตรของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่ ด้วยมุมต่างๆ ที่โรเตอร์หมุนใน 98.1816 องศา ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.21 - 5.24 แสดงถึงการกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเริ่มตั้งแต่มุม 0 องศา ถึง 98.1816 องศา โดยแต่ละรูปโรเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาต่างกันด้วยมุมทีละ 32.7272 องศา

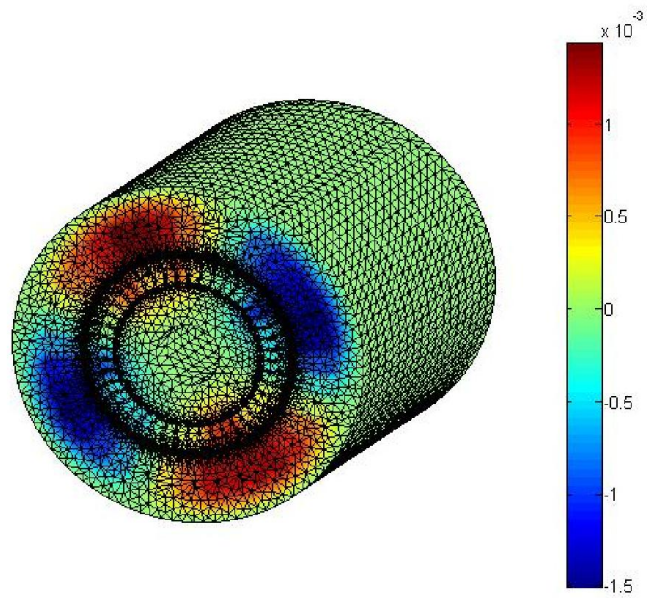




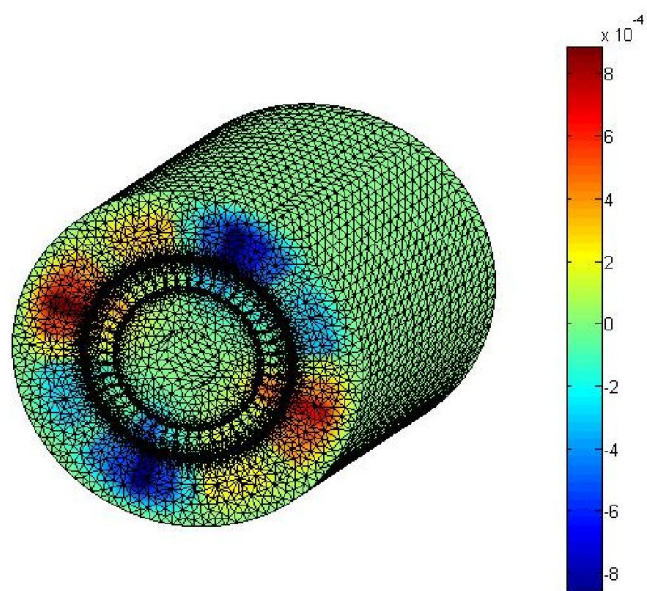
รูปที่ 5.21 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ( $Wb/m$ ) เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์  
แบบเฉียงเต็มร่องเมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 0 องศา



รูปที่ 5.22 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ( $Wb/m$ ) เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์  
แบบเฉียงเต็มร่องเมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 32.7272 องศา



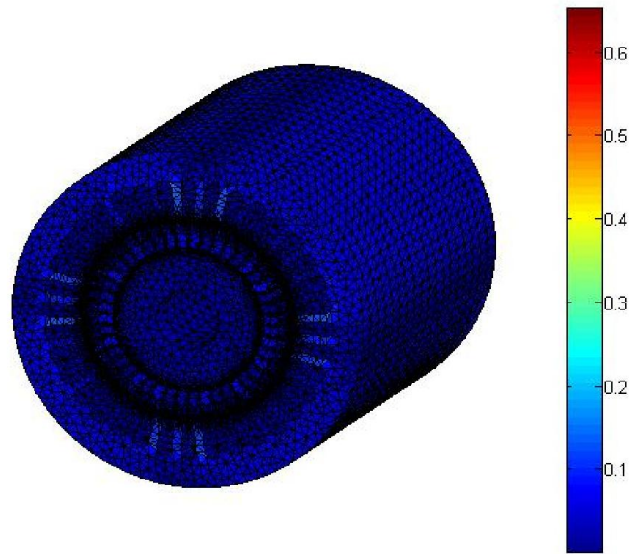
รูปที่ 5.23 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ( $Wb/m$ ) เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์  
แบบเฉียงเต็มร่องเมื่อ โรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 65.4544 องศา



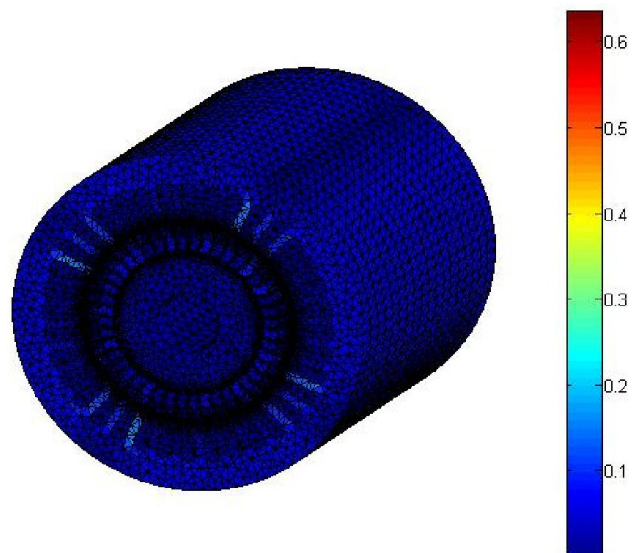
รูปที่ 5.24 การกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก ( $Wb/m$ ) เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์  
แบบเฉียงเต็มร่องเมื่อ โรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 98.1816 องศา

จากรูปที่ 5.21 - 5.24 จะสังเกตเห็นว่า ทางเดินของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ เมื่อพิจารณามอเตอร์หมุนในสถานะอยู่ตัวและมีโหลดเต็มพิกัดปรากฏให้เห็นถึงจำนวนขั้วแม่เหล็ก  $N$  (สีแดง) และ  $S$  (สีน้ำเงิน) สลับกันไปจำนวน 4 ขั้ว เท่ากับจำนวนขั้วของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลอย่างเด่นชัด ซึ่งพิจารณาควบคู่กับค่าแถบสีทางด้านขวามือที่มีทั้งค่าบวกและค่าลบ โดยค่าบวกที่มีขนาดสูงสุดจะแทนได้ด้วยสีแดงเข้ม และค่าลบที่มีขนาดสูงสุดจะแทนด้วยสีน้ำเงินเข้ม ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 5.21 - 5.24 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กแบ่งออกเป็น 2 แถบสีหลักๆ คือ แดงและน้ำเงินสลับกันไป 4 กลุ่ม ซึ่งจำนวนกลุ่มนี้เปรียบเสมือนจำนวนขั้วแม่เหล็ก โดยกลุ่มสีแดงหมายถึงขั้ว  $N$  ซึ่งมีทิศทางของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก  $A$  มีทิศพุ่งเข้าหาหน้ากระดาน ส่วนกลุ่มสีน้ำเงินหมายถึงขั้ว  $S$  ซึ่งมีทิศทางของ  $A$  พุ่งออกจากหน้ากระดาน โดยศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะเริ่มชี้ทางเดินเมื่อโรเตอร์หมุนผ่านไปประมาณ  $180^\circ$  (ในกรณีที่พิจารณาในสภาวะไร้โหลดจะมีค่าเท่ากับ  $180^\circ$  พอดิ (Ishibashi, Noda, and Mochizuki, 1998)) และศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กจะแสดงพฤติกรรมที่เรียกว่าสนามแม่เหล็กหมุน โดยมีทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกาไปในทิศทางเดียวกับการหมุนของโรเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล

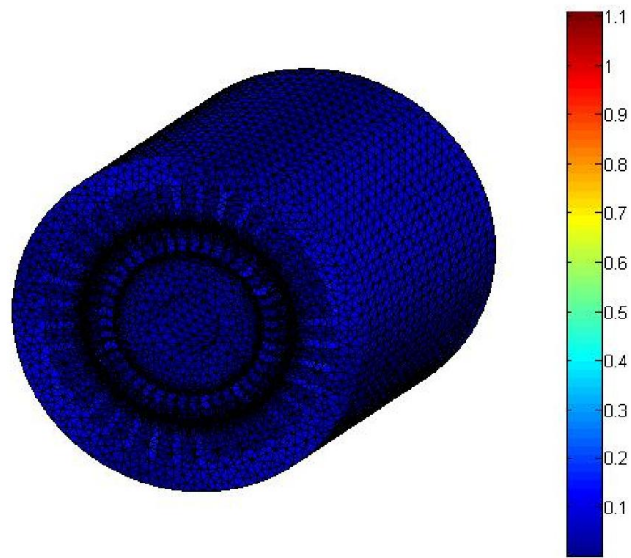
เมื่อทราบค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กก็สามารถนำไปคำนวณค่าสนามแม่เหล็กได้ การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กของมอเตอร์นั้นสามารถกระทำได้ด้วยการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก รูปที่ 5.25 - 5.28 แสดงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ตามปริมาตรของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อโรเตอร์หมุนไปจากมุม 0 องศา ถึง 98.1816 องศา โดยโรเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาด้วยมุมต่างกัน 32.7272 องศา



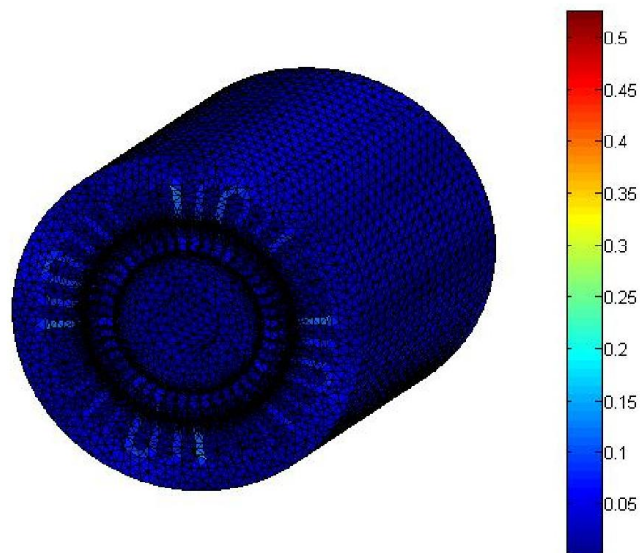
รูปที่ 5.25 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก ( $T$ ) เมื่อพิจารณาช่องโรเตอร์  
แบบเฉียงเต็มช่องเมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 0 องศา



รูปที่ 5.26 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก ( $T$ ) เมื่อพิจารณาช่องโรเตอร์  
แบบเฉียงเต็มช่องเมื่อโรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 32.7272 องศา



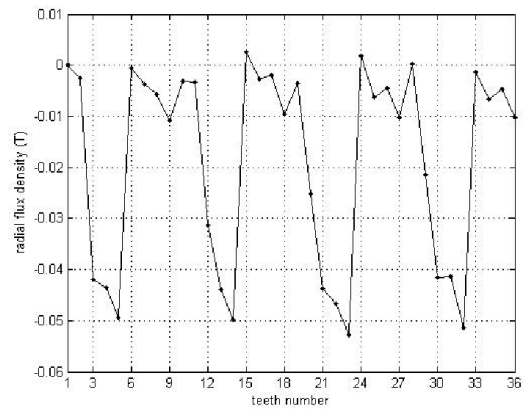
รูปที่ 5.27 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก ( $T$ ) เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์  
แบบเฉียงเต็มร่องเมื่อ โรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 65.4544 องศา



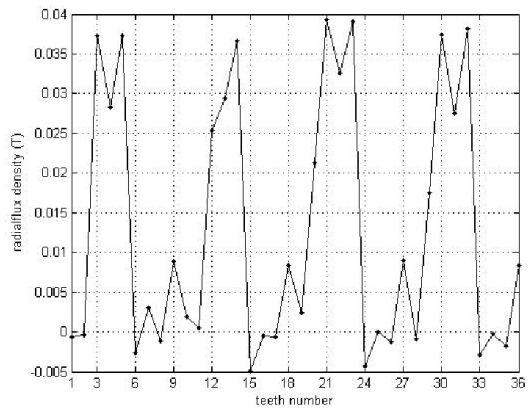
รูปที่ 5.28 การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก ( $T$ ) เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์  
แบบเฉียงเต็มร่องเมื่อ โรเตอร์หมุนไปเป็นมุม 98.1816 องศา

ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่ได้จากการจำลองผลในแต่ละจุดต่อที่กระจายบนพื้นที่หน้าตัดตามแนวแกน  $z$  ของมอเตอร์ ( $A_z$ ) จะนำไปใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในแนวรัศมี ( $B_r$ ) ที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ตรงส่วนของฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ทั้ง 36 ซี่ ที่มีมุมการหมุนของโรเตอร์แปรเปลี่ยนไป โดยรูปที่ 5.29 เป็นการแสดงค่า  $B_r$  ที่กระทำตรงฟันของสเตเตอร์ในแต่ละซี่ ซึ่งเป็นการพิจารณาร่องโรเตอร์แบบเฉียงครึ่งร่องเมื่อพิจารณาโรเตอร์หมุนไป  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  และ  $180^\circ$  (ซี่ที่ 1 คือตำแหน่ง  $0^\circ$  เทียบกับแกน  $x+$  พอดี และซี่ถัดไปจะวางตัวเป็นลำดับในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา) จากรูปที่ 5.29 จะสังเกตเห็นว่า รูปกราฟของ  $B_r$  จะมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์แอมพลิจูดสูงสุดประมาณ 0.05 tesla ที่มีคาบเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนซี่ทั้งหมด โดยกราฟ  $B_r$  จะมีลักษณะเหมือนเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนผ่านไปประมาณ  $180^\circ$  และเมื่อพิจารณารูปกราฟของ  $B_r$  เมื่อโรเตอร์หมุนทำมุม  $0^\circ$  ดังรูปที่ 5.29(ก) เทียบกับรูปของการกระจายตัวศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเมื่อโรเตอร์หมุนทำมุม  $0^\circ$  เช่นกัน ดังรูปที่ 5.21 จะสังเกตเห็นว่าค่า  $B_r$  ในรูปที่ 5.29(ก) จะมีขนาดสูงสุด ณ ตำแหน่งฟันของสเตเตอร์ซี่ที่ 5, 14, 23 และ 32 และจะมีค่าเป็นศูนย์ ณ ตำแหน่งฟันของสเตเตอร์ซี่ที่ 6, 15, 24 และ 33 โดยระยะห่างในแต่ละซี่ที่ปรากฏจะมีค่าเป็น 9 ซึ่งเท่ากับ 1 พิตช์ขั้วแม่เหล็กพอดิ (1 pole pitch) ซึ่งจะสอดคล้องกับรูปที่ 5.21 โดยศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก  $A$  จะมีค่าเป็นศูนย์ ณ ซี่ที่ 5, 14, 23 และ 32 และจะมีขนาดสูงสุด ณ ซี่ที่ 6, 15, 24 และ 33 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากค่าสนามแม่เหล็ก  $B$  ได้จากการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก  $A$  ซึ่งรูปที่ 5.29(ข) และ 5.29(ค) สามารถพิจารณาเทียบได้ในทำนองเดียวกัน จะพบว่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรง

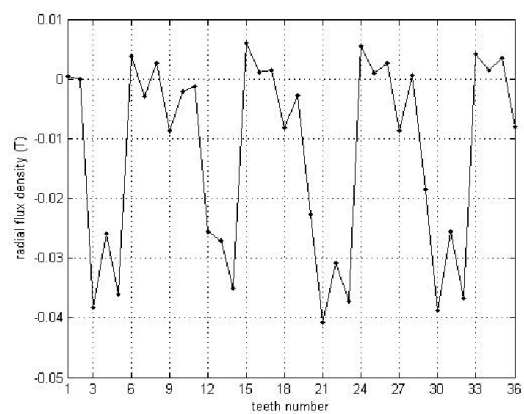
เมื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กแล้ว จากนั้นจึงใช้สมการความเค้นของแมกซ์เวลล์หาค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวรัศมี ( $F_r$ ) ที่กระทำกับช่องอากาศตรงฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ ซึ่ง  $F_r \propto B_r^2$  โดยรูปที่ 5.30 เป็นการแสดงค่า  $F_r$  เทียบกับเวลา โดยพิจารณา  $F_r$  กระทำกับช่องอากาศตรงส่วนของฟันสเตเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนครบ 1 รอบ เฉพาะในซี่ที่ 1 ถึงซี่ที่ 9 จากทั้งหมด 36 ซี่ เนื่องจากผลของ  $F_r$  จะเริ่มซ้ำเป็นคาบในทุกๆ 9 ซี่ ซึ่งสอดคล้องกับระยะ 1 พิตช์ขั้วแม่เหล็ก ดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้น จะพบว่าแรงแม่เหล็กในแนวรัศมีจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรง



(ก)



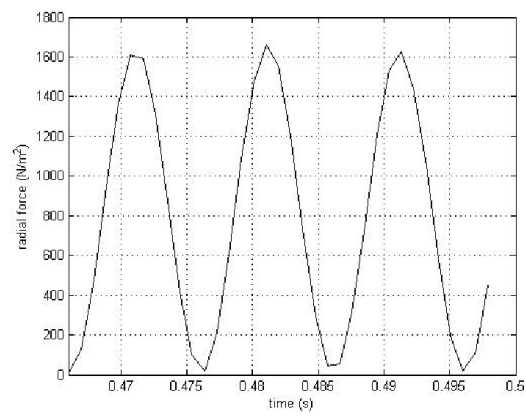
(ข)



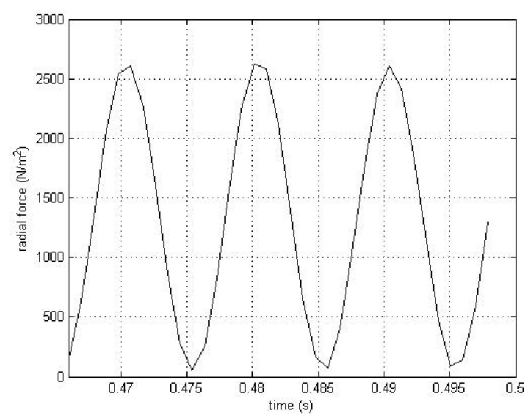
(ค)

รูปที่ 5.29 สนามแม่เหล็กตามแนวรัศมีที่กระทำกับฟันสเตเตอร์เมื่อพิจารณา  
 ร่องโรเตอร์แบบเฉียงเต็มร่องเมื่อโรเตอร์หมุนไป (ก)  $0^\circ$ , (ข)  $90^\circ$  และ (ค)  $180^\circ$

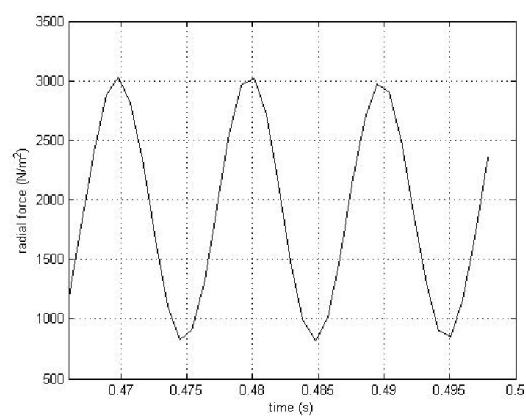




(n)

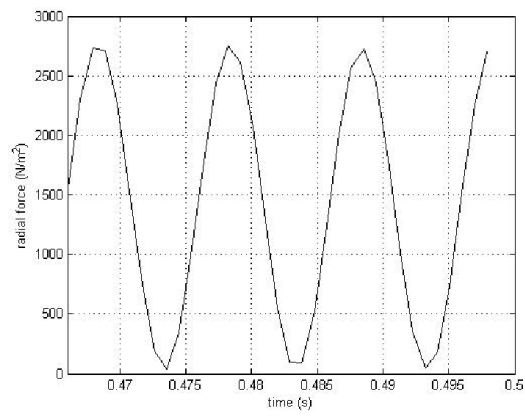


(ñ)

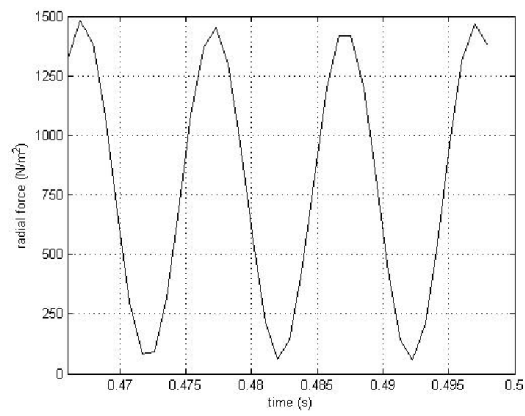


(ñ)

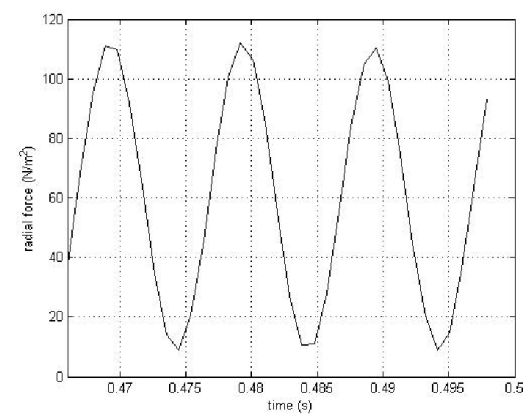




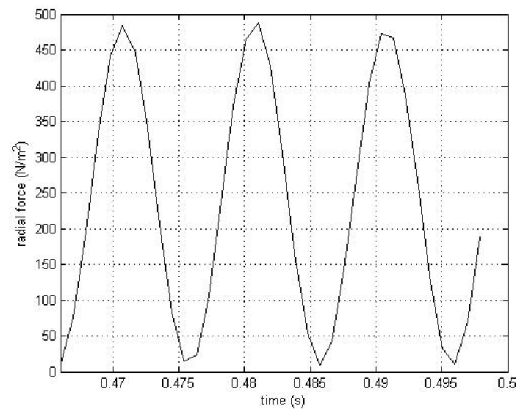
(a)



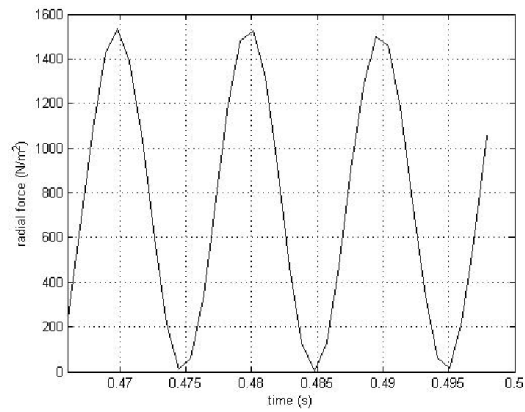
(b)



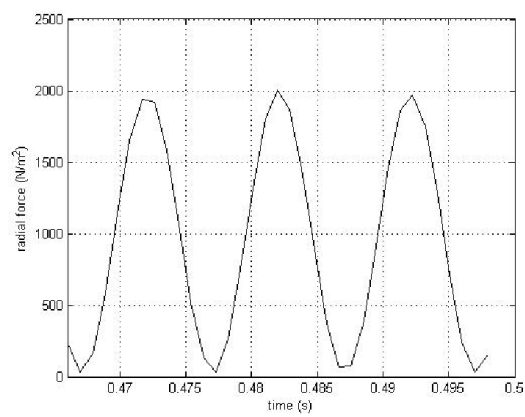
(c)



(ข)



(ง)



(ฉ)

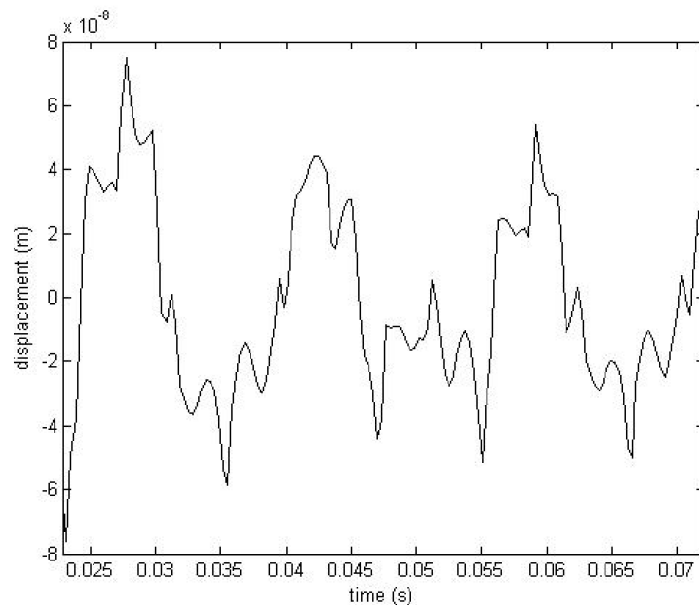
รูปที่ 5.30 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับฟันสเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบเฉียงเต็มร่อง  
(ก) ซี่ที่ 1, (ข) ซี่ที่ 2, (ค) ซี่ที่ 3, (ง) ซี่ที่ 4, (จ) ซี่ที่ 5, (ฉ) ซี่ที่ 6, (ช) ซี่ที่ 7, (ซ) ซี่ที่ 8, (ฉ) ซี่ที่ 9

### 5.3 ผลการจำลองการสั่นสะเทือนและอภิปรายผล

การสั่นสะเทือนในมอเตอร์มีสาเหตุมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นแรงภายนอกมากระทำกับมอเตอร์ให้เกิดการสั่นสะเทือน ในงานวิจัยนี้ได้คำนวณการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณามอเตอร์เป็นแบบอิลิเมนต์ซึ่งเหมาะสำหรับพิจารณาการสั่นในรูปแบบของการบิดเบี้ยวของสเตเตอร์

#### 5.3.1 ผลการจำลองการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรง

การจำลองการสั่นสะเทือน จะใช้โปรแกรมจำลองผลการสั่นสะเทือนดังแสดงรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 4.4.2 ของบทที่ 4 ซึ่งใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหา วิธีการนี้สามารถนำมาซึ่งผลลัพธ์ของการกระจัดที่ละเอียดและครอบคลุมตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ จากโปรแกรมจำลองผลการสั่นสะเทือน ผลลัพธ์ที่ปรากฏคือผลของการสั่นสะเทือนที่เป็นการกระจัดแสดงอยู่ในรูปการกระจัดตามแนวรัศมี รูปที่ 5.31 เป็นการแสดงผลการจำลองของการกระจัดตามแนวแกนรัศมีเทียบกับเวลาตรงตำแหน่งส่วนโครงสเตเตอร์ของมอเตอร์ เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรง



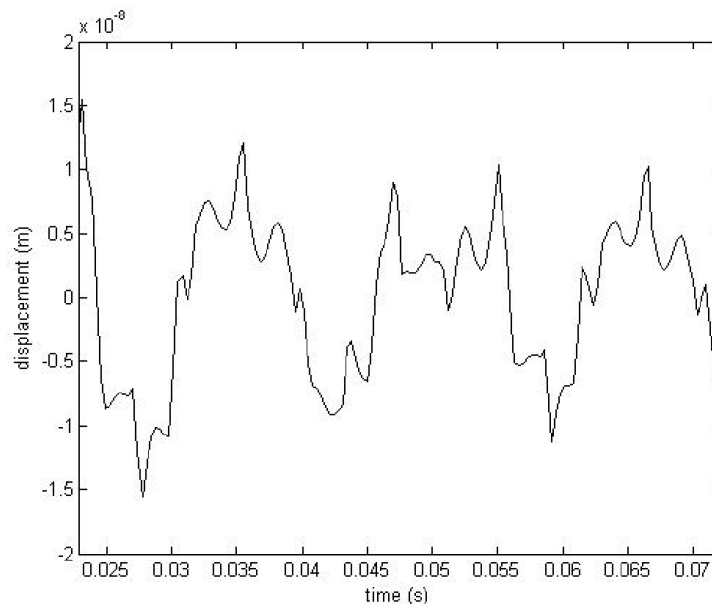
รูปที่ 5.31 การกระจัดตามแนวแกนรัศมีของมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรง

รูปที่ 5.31 เป็นผลการจำลองการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนือเวลาที่สถานะคงตัว จะเห็นว่าการสั่นสะเทือนตรงตำแหน่งส่วนโครงสเตเตอร์ของมอเตอร์ในแนวแกนตามแนวแกนรัศมี จะมีการสั่นขึ้นลงในลักษณะที่เป็นรายคาบ (ระยะกระจัดที่ 0 m คือตำแหน่งที่อ้างอิง) โดยแอมพลิจูดของ

การกระจัดเฉลี่ยในสภาวะคงตัวมีค่าประมาณ  $5.6524 \times 10^{-8} m$  และจากรูปจะสังเกตเห็นว่ามีคาบของการสั่นขึ้นลง  $T = 0.01 \text{ sec}$  โดยหาความถี่การสั่นได้จาก  $f = 1/T$  ซึ่งจะได้ความถี่ประมาณ 100 Hz ทั้งนี้เพราะความถี่ที่เกิดการสั่นสะท้อนจะมีค่าเท่ากับความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำตามทฤษฎีแล้วแรงแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแรงภายนอกที่มากระทำจะต้องมีความถี่เป็น 100 Hz (ความถี่ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเป็น 2 เท่าของความถี่จากแหล่งจ่ายไฟ (Ishibashi, Noda, and Mochizuki, 1998)) เพราะความถี่จากแหล่งจ่ายไฟคือ 50 Hz ซึ่งจากผลการจำลองถ้าพิจารณาจากความถี่ก็ถือว่าใกล้เคียงกับทฤษฎี

### 5.3.2 ผลการจำลองการสั่นสะท้อนเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบเฉียงครึ่งร่อง

การจำลองการสั่นสะท้อน จะใช้โปรแกรมจำลองผลการสั่นสะท้อนดังแสดงรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 4.4.2 ของบทที่ 4 ซึ่งใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหา วิธีการนี้สามารถนำมาซึ่งผลลัพธ์ของการกระจัดที่ละเอียดและครอบคลุมตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์ จากโปรแกรมจำลองผลการสั่นสะท้อน ผลลัพธ์ที่ปรากฏคือผลของการสั่นสะท้อนที่เป็นการกระจัดแสดงอยู่ในรูปการกระจัดตามแนวรัศมี รูปที่ 5.32 เป็นการแสดงผลการจำลองของการกระจัดตามแนวแกนรัศมีเทียบกับเวลาตรงตำแหน่งส่วนโครงสร้างเตเตอร์ของมอเตอร์ เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์เฉียงครึ่งร่อง

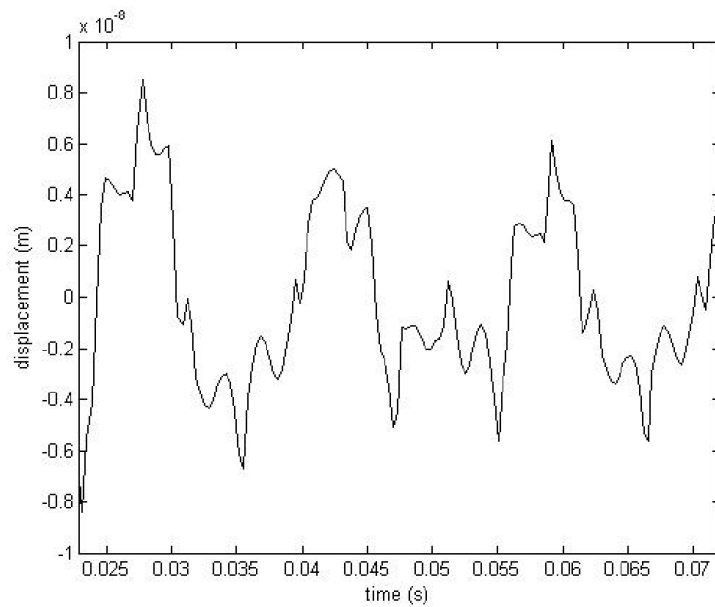


รูปที่ 5.32 การกระจัดตามแนวแกนรัศมีของมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบเฉียงครึ่งร่อง

รูปที่ 5.32 เป็นผลการจำลองการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สภาวะคงตัว จะเห็นว่าการสั่นสะเทือนตรงตำแหน่งส่วนโครงสร้างเตเตอร์ของมอเตอร์ในแนวแกนตามแนวแกนรัศมี จะมีการสั่นขึ้นลงในลักษณะที่เป็นรายคาบ (ระยะกระจัดที่  $0\text{ m}$  คือตำแหน่งที่อ้างอิง) โดยแอมพลิจูดของการกระจัดเฉลี่ยในสภาวะคงตัวมีค่าประมาณ  $1.1375 \times 10^{-8}\text{ m}$  และจากรูปจะสังเกตเห็นว่ามีคาบของการสั่นขึ้นลง  $T = 0.01\text{ sec}$  โดยหาความถี่การสั่นได้จาก  $f = 1/T$  ซึ่งจะได้ความถี่ประมาณ  $100\text{ Hz}$  ทั้งนี้เพราะความถี่ที่เกิดการสั่นสะเทือนจะมีค่าเท่ากับความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำตามทฤษฎีแล้วแรงแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแรงภายนอกที่มากระทำจะต้องมีความถี่เป็น  $100\text{ Hz}$  (ความถี่ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเป็น 2 เท่าของความถี่จากแหล่งจ่ายไฟ (Ishibashi, Noda, and Mochizuki, 1998)) เพราะความถี่จากแหล่งจ่ายไฟคือ  $50\text{ Hz}$  ซึ่งจากผลการจำลองถ้าพิจารณาจากความถี่ก็ถือว่าใกล้เคียงกับทฤษฎี พบว่าแอมพลิจูดการกระจัดเฉลี่ยจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการพิจารณาโรเตอร์แบบร่องตรง

### 5.3.3 ผลการจำลองการสั่นสะเทือนเมื่อพิจารณาโรเตอร์แบบเฉียงเต็มร่อง

การจำลองการสั่นสะเทือน จะใช้โปรแกรมจำลองผลการสั่นสะเทือนดังแสดงรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 4.4.2 ของบทที่ 4 ซึ่งใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหา วิธีการนี้สามารถนำมาซึ่งผลลัพธ์ของการกระจัดที่ละเอียดและครอบคลุมตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของมอเตอร์จากโปรแกรมจำลองผลการสั่นสะเทือน ผลลัพธ์ที่ปรากฏคือผลของการสั่นสะเทือนที่เป็นการกระจัดแสดงอยู่ในรูปการกระจัดตามแนวรัศมี รูปที่ 5.33 เป็นการแสดงผลการจำลองของการกระจัดตามแนวแกนรัศมีเทียบกับเวลาตรงตำแหน่งส่วนโครงสร้างเตเตอร์ของมอเตอร์ เมื่อพิจารณาโรเตอร์แบบเฉียงเต็มร่อง



รูปที่ 5.33 การกระจัดตามแนวแกนรัศมีของมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบเฉียงเต็มร่อง

รูปที่ 5.33 เป็นผลการจำลองการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สภาวะคงตัว จะเห็นว่าการสั่นสะเทือนตรงตำแหน่งส่วนโครงสร้างเตเตอร์ของมอเตอร์ในแนวแกนตามแนวแกนรัศมี จะมีการสั่นขึ้นลงในลักษณะที่เป็นรายคาบ (ระยะกระจัดที่ 0 m คือตำแหน่งที่อ้างอิง) โดยแอมพลิจูดของการกระจัดเฉลี่ยในสภาวะคงตัวมีค่าประมาณ  $0.6372 \times 10^{-8} m$  และจากรูปจะสังเกตเห็นว่ามีคาบของการสั่นขึ้นลง  $T = 0.01$  sec โดยหาความถี่การสั่นได้จาก  $f = 1/T$  ซึ่งจะได้ความถี่ประมาณ 100 Hz ทั้งนี้เพราะความถี่ที่เกิดการสั่นสะเทือนจะมีค่าเท่ากับความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำตามทฤษฎีแล้วแรงแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแรงภายนอกที่มากระทำจะต้องมีความถี่เป็น 100 Hz (ความถี่ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเป็น 2 เท่าของความถี่จากแหล่งจ่ายไฟ (Ishibashi, Noda, and Mochizuki, 1998)) เพราะความถี่จากแหล่งจ่ายไฟคือ 50 Hz ซึ่งจากผลการจำลองถ้าพิจารณาจากความถี่ที่ถือได้ว่าใกล้เคียงกับทฤษฎี พบว่าแอมพลิจูดการกระจัดเฉลี่ยจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการพิจารณาร่องโรเตอร์แบบร่องตรงลดลงคิดเป็นร้อยละ 0.88

## 5.4 สรุป

ในบทที่ 5 นี้ ได้ดำเนินการจำลองผลของสนามแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์เฉียงออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ ร่องโรเตอร์แบบร่องตรง, ร่องโรเตอร์แบบเฉียงครึ่งร่อง และ ร่องโรเตอร์แบบเฉียงเต็มร่อง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขนาดของการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แต่ละแบบ ซึ่งการกระจัดเฉลี่ยที่เป็นตัวชี้วัดถึงขนาดของการ

สิ้นสละเทือนในมอเตอร์จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อพิจารณาร่องโรเตอร์แบบเฉียงเต็มร่อง โดยคิดเป็นร้อยละ 0.88 เมื่อเทียบกับร่องโรเตอร์แบบร่องตรง