

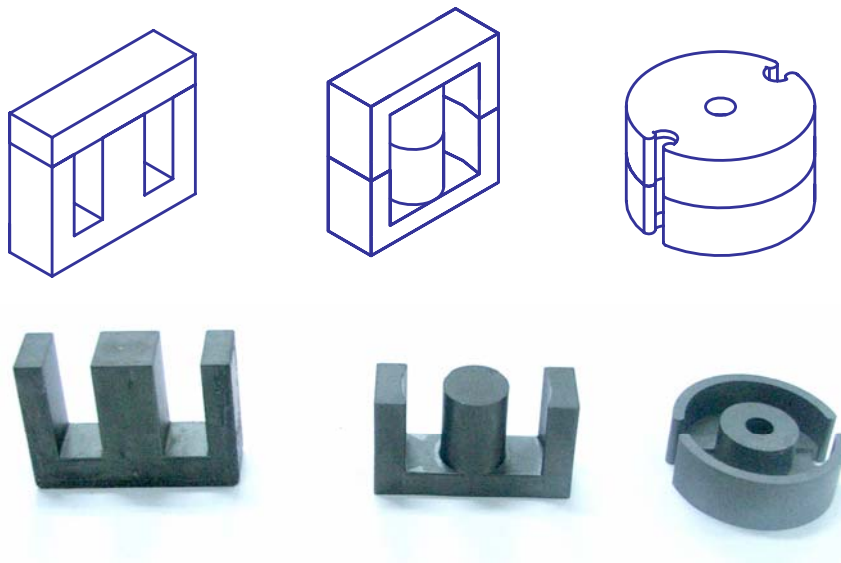
บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 การวิเคราะห์ผลการเกิดครอสเรกกูเลชันจากแกนหม้อแปลงแต่ละชนิด

จากการทดลองสามารถวิเคราะห์ผลกระทบจาก โครงสร้างแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแต่ละชนิด ที่ส่งผลต่อการเกิดครอสเรกกูเลชันในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาท์พุท ซึ่งภาพประกอบ 5-1 จะแสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้าง และตาราง 5-1 แสดงคุณสมบัติของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

5.1.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างของชนิดแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง



ภาพประกอบ 5-1 แกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกนEI40, ETD39 และ Pot36

ตาราง 5-1 คุณสมบัติของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

Core type	V_e/mm^3	Kg/mm^5
EI40/27/12	11100	81588.3
ETD39/20/11	11500	76202.9
Pot36/22	10700	82846.8

การวัดค่าพารามิเตอร์ของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงชนิด EI40, ETD39 และ Pot36 ค่าที่ได้จากการวัดจะอยู่ในรูปของแบบจำลอง Extended Cantilever ซึ่งใช้อธิบายพฤติกรรมการเกิดค่าครอสเรกกูเลชันในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จากหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง โดยผลการเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำรั่วในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากการพันขดลวดแบบเดียวกัน แสดงได้ดังตาราง 5-2

ตาราง 5-2 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของชนิดแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

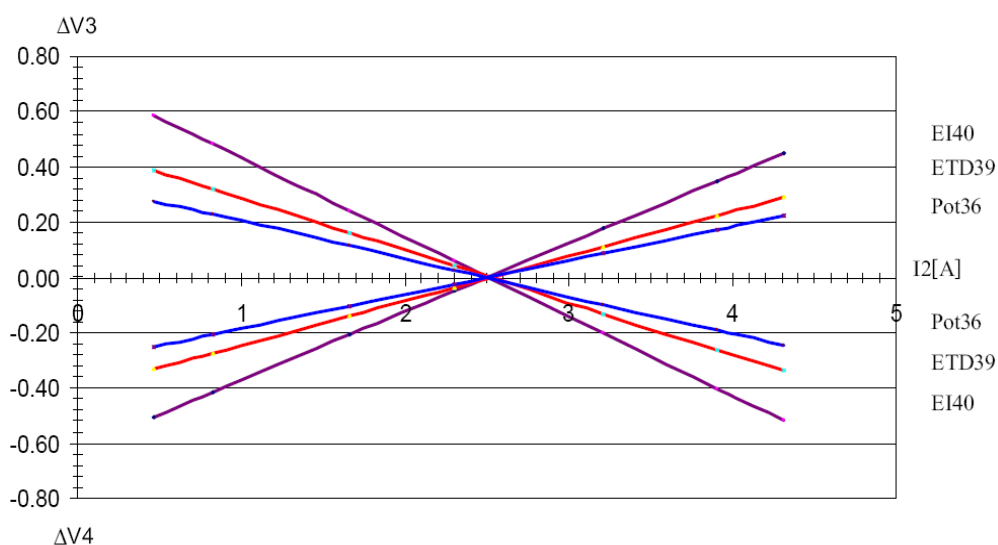
Inductance parameter	Measure values		
	EI40	ETD39	Pot36
n_2	0.1	0.1	0.1
n_3	0.3	0.3	0.3
n_4	0.3	0.3	0.3
L_{11}	279 μH	293 μH	280 μH
l_{12}	27 μH	24 μH	22 μH
l_{13}	6 μH	4.8 μH	4 μH
l_{14}	7.8 μH	7 μH	7 μH
l_{23}	6 μH	5 μH	5 μH
l_{24}	9 μH	7.4 μH	7 μH
l_{34}	3 μH	3 μH	3 μH

จากการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำรั่วที่เกิดขึ้นในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากแกนทั้ง 3 ชนิด พบว่าภายในแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงชนิด EI40 มีค่าความเหนี่ยวนำรั่วมากที่สุด ตามด้วยแกนชนิด ETD39 และแกนชนิด Pot36 มีค่าความเหนี่ยวนำรั่วน้อยที่สุด

5.1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าครอสเรกกูเลชันจากชนิดแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

เมื่อนำหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงไปทดสอบกับวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต เพื่อหาค่าครอสเรกกูเลชันที่เกิดขึ้นจากผลกระทบของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง เมื่อกระแสโหลดที่เอาต์พุตหลัก W_2 มีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.5-4.5A และกระแสโหลดที่เอาต์พุตย่อย W_3 และ W_4 มีค่าคงที่ที่ 1A โดยสภาวะการทำงานทุกเอาต์พุตจะอยู่โหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (CCM)

จากการทดสอบค่าครอสเรกจูเลชันที่เกิดขึ้นพบว่าจะมีความสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำรั่วในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง โดยหากเกิดค่าความเหนี่ยวนำรั่วมากก็จะส่งผลต่อการเกิดครอสเรกจูเลชันมาก ดังภาพประกอบ 5-2 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลการทดลองของการเกิดค่าครอสเรกจูเลชันจากชนิดของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงทั้ง 3 ชนิด ซึ่งพบว่าแกน EI40 มีค่าครอสเรกจูเลชันมากที่สุด ตามด้วยแกน ETD39 และแกน Pot36 จะมีค่าครอสเรกจูเลชันน้อยที่สุด



ภาพประกอบ 5-2 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงครอสเรกจูเลชันของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

เมื่อนำรูปคลื่นกระแสเอาต์พุตจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองการวิเคราะห์ N-port พบว่ามีค่าสัญญาณกระแสเอาต์พุตที่ใกล้เคียงกันมาก และเมื่อทดลองหาค่าครอสเรกจูเลชันในวงจรหลายแบบคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต โดยแสดงในรูปของแบบจำลอง output resistance matrix : \mathbf{R} ซึ่งเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุต $\Delta\mathbf{V}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาต์พุต $\Delta\mathbf{I}$ เมื่อ $(\Delta\mathbf{V} = -\mathbf{R}\Delta\mathbf{I})$ โดยค่าพารามิเตอร์ในเมตริก \mathbf{R} คือค่าความชันของเส้นกราฟของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต ซึ่งผลจากการทดสอบค่า *output resistance matrix* จากแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงชนิด EE40, ETD39 และ แกน Pot36 แสดงดังสมการที่ (5-1) ถึง (5-3)

$$\text{EI40} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.45 & 0.78 & 0.67 \\ 0.65 & 1.43 & 0.92 \\ -0.78 & -1.12 & -1.26 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-1)$$

$$\text{ETD39} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.35 & 0.53 & 0.46 \\ 0.39 & 0.68 & 0.43 \\ -0.31 & -0.58 & -0.96 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-2)$$

$$\text{Pot36} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.30 & 0.32 & 0.39 \\ 0.27 & 0.54 & 0.32 \\ 0.27 & -0.44 & -0.85 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-3)$$

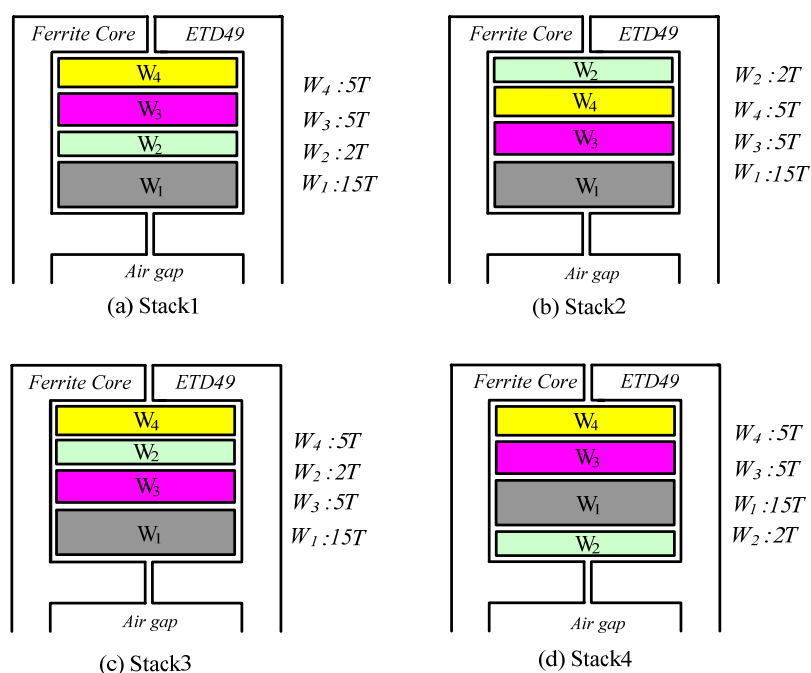
จากสมการข้างต้นพบว่ามีความสัมพันธ์กับผลการทดลอง เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ในเมตริก \mathbf{R} ที่อยู่นอกเหนือจากพารามิเตอร์ในแนวเส้นทแยงมุม ซึ่งแสดงค่าครอสเรกกูเลชันของแต่ละเอาต์พุตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสในเอาต์พุตอื่นของหม้อแปลงจากแกนทั้ง 3 ชนิด พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก อย่างไรก็ตามหากพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ แกนหม้อแปลงชนิด Pot จะมีค่าครอสเรกกูเลชันดีที่สุดและแกนหม้อแปลงชนิด EI จะให้ค่าครอสเรกกูเลชันต่ำที่สุด ซึ่งจากการทดลองในส่วนนี้สรุปได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำร่วมมีค่าสอดคล้องกับการเกิดค่าครอสเรกกูเลชัน ซึ่งโครงสร้างของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะมีผลต่อการเกิดครอสเรกกูเลชัน แต่จะมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตที่ใกล้เคียงกัน หากพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำร่วมในแกนทั้ง 3 ชนิด พบว่าแกนที่มีค่าความเหนี่ยวนำร่วมมากจะทำให้เกิดค่าครอสเรกกูเลชันที่ต่ำกว่าแกนที่มีค่าความเหนี่ยวนำร่วมน้อย

อย่างไรก็ตามนอกจากผลของโครงสร้างของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อค่าเหนี่ยวนำร่วมในแกนหม้อแปลง ได้แก่ ตำแหน่งการวางขดลวด อัตราส่วนหม้อแปลง รวมไปถึง ผลของกระแสไหลของแรงดันที่เอาต์พุต ซึ่งหากต้องการปรับปรุงค่าครอสเรกกูเลชันในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิดหลายเอาต์พุต ควรจะพิจารณาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลกระทบด้วย เพื่อที่จะควบคุมค่าครอสเรกกูเลชันที่เกิดขึ้นในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหม้อแปลงจะส่งผลต่อการปรับปรุงค่าครอสเรกกูเลชันได้ แต่จะส่งผลได้น้อยมาก และประมาณได้ว่าไม่ควรปรับปรุงค่าครอสเรกกูเลชันโดยใช้การเปลี่ยนแปลงชนิดของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง แต่ควรไปพิจารณาในการออกแบบการวางตำแหน่งขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งจะได้นำเสนอในส่วนต่อไป

5.2 ผลการวิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

5.2.1 ผลการวิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากการพันแบบ Stack

การทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง จากการออกแบบหม้อแปลงแบบ Stack1 ถึง Stack4 โดยในแต่ละแบบจะจัดให้มีการวางขดลวดเป็นชุดและมีการเปลี่ยนตำแหน่งของเอาต์พุตหลัก ดังภาพประกอบ 5-3



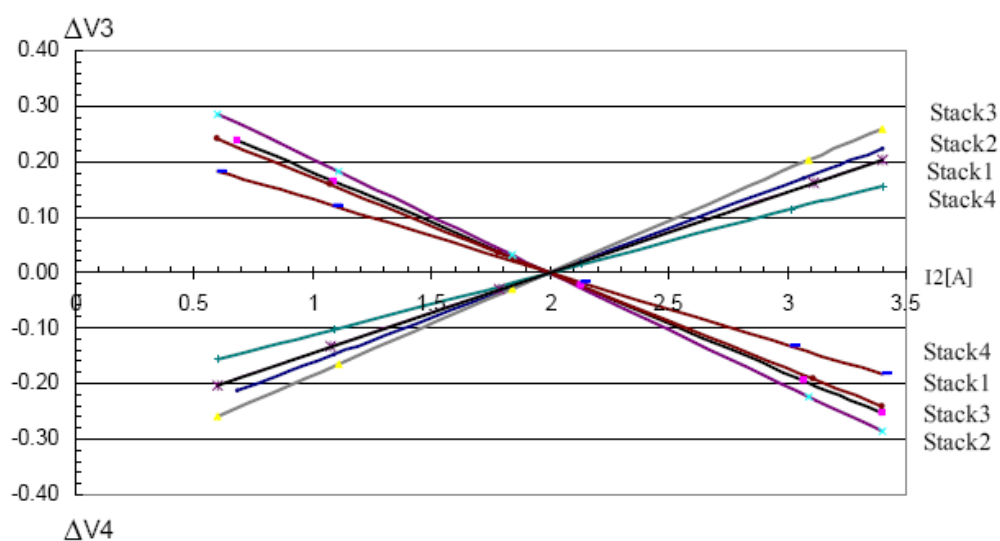
ภาพประกอบ 5-3 การเปรียบเทียบการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack

ผลทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากการพันแบบ Stack1 ถึง Stack4 โดยการสลับตำแหน่งการวางขดลวดเอาต์พุตหลักเพื่อศึกษาผลกระทบของค่าความเหนี่ยวนำรั่วในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงที่เป็นสาเหตุของการเกิดครอสเรกกูเลชัน ในรูปของแบบจำลอง Extended Cantilever และแบบจำลอง N-port ซึ่งผลจากการวัดค่าพารามิเตอร์ในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง พบว่าค่าความเหนี่ยวนำรั่วจากการวางตำแหน่งขดลวดแบบ Stack4 ซึ่งมีการวางขดลวดเอาต์พุตหลักไว้ใกล้แกนกลางของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงมากที่สุด จะส่งผลทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำรั่วระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ L_{12} มีค่าน้อยที่สุด และ L_{13} , L_{14} ก็จะมีค่าน้อยกว่าการวางขดลวดแบบอื่นๆ และค่าความเหนี่ยวนำรั่วระหว่างขดลวดทุติยภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ L_{23} , L_{24} และ L_{34} ก็จะมีค่ามากกว่าการวางขดลวดแบบอื่นๆ ดังตาราง 5-3

ตาราง 5-3 ค่าพารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำร่วจากการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack

Inductance parameter	Measure values			
	Stack1	Stack2	Stack3	Stack4
n_2	0.15	0.13	0.15	0.15
n_3	0.3	0.3	0.3	0.3
n_4	0.3	0.3	0.3	0.3
L_{11}	296 μH	312 μH	290 μH	294 μH
l_{12}	12 μH	143 μH	64 μH	6 μH
l_{13}	5 μH	3.2 μH	3 μH	3 μH
l_{14}	18 μH	11.3 μH	16.7 μH	9.6 μH
l_{23}	13 μH	35 μH	11 μH	59 μH
l_{24}	37 μH	10.6 μH	12.4 μH	82 μH
l_{34}	3 μH	2.8 μH	6 μH	3 μH

เมื่อนำหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงที่มีการพันแบบ Stack ทั้ง 4 แบบ ไปทดสอบในวงจรพลาซมแบบคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอ้าท์พุท ที่กระแสเอ้าท์พุทหลัก I_2 มีกระแสไหลดเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.5-3.5A ส่วนกระแสไหลดที่เอ้าท์พุทย่อย I_3 และ I_4 มีค่าคงที่ที่ 1A ผลที่ได้จากการทดลองเป็นดังภาพประกอบ 5-4



ภาพประกอบ 5-4 ผลการทดสอบค่าครอสเรกกูแลชันจากหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack

เมื่อทดลองหาค่าครอสเรกจูเลชันในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาท์พุท โดยแสดงในรูปของแบบจำลอง output *résistance matrix* :**R** ผลจากการทดสอบค่า *output résistance matrix* ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack แสดงคังสมการที่ (5-4) ถึง (5-7)

$$\text{Stack1} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.31 & 0.17 & 0.16 \\ 0.16 & 1.06 & 0.46 \\ -0.18 & -0.52 & -0.95 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-4)$$

$$\text{Stack2} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.33 & 0.16 & 0.16 \\ 0.17 & 0.89 & 0.44 \\ -0.20 & -0.41 & -0.63 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-5)$$

$$\text{Stack3} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.35 & 0.17 & 0.16 \\ 0.15 & 0.95 & 0.41 \\ -0.17 & -0.46 & -0.87 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-6)$$

$$\text{Stack4} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.35 & 0.15 & 0.14 \\ 0.12 & 0.66 & 0.41 \\ -0.13 & -0.21 & -0.79 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-7)$$

เมื่อนำผลค่าความเหนี่ยวนำร่วมาพิจารณาร่วมกับพฤติกรรมการเกิดครอสเรกจูเลชัน พบว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาท์พุทย่อย V_3 และ V_4 ของการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack4 จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า *output résistance matrix* นั้นคือค่าความเหนี่ยวนำร่วระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิ l_{12}, l_{13} และ l_{14} จะมีค่าน้อยที่สุด และค่าความเหนี่ยวนำร่วระหว่างขดลวดทุติยภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ l_{23}, l_{24} และ l_{34} จะมีค่ามากที่สุด สำหรับการวางขดลวดแบบอื่นๆ จะมีผลเช่นเดียวกับผลการทดลองในกราฟเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาท์พุท

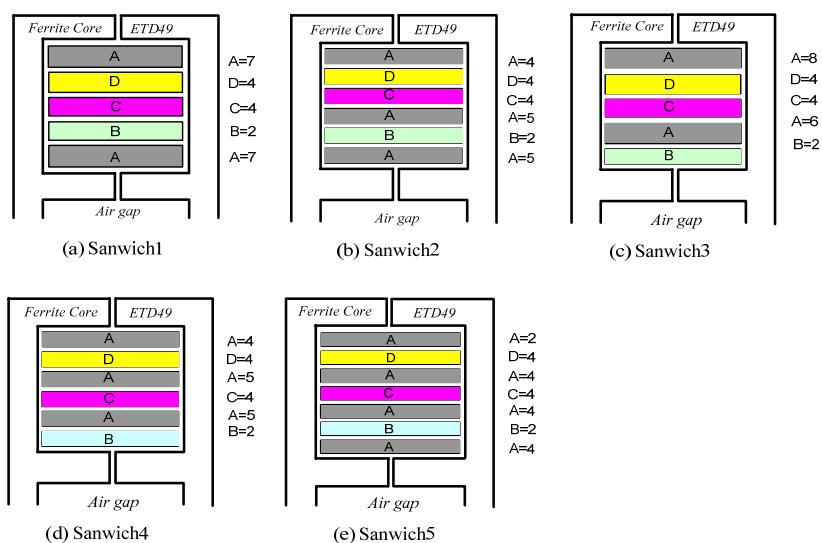
ดังนั้นหากควบคุมค่าความเหนี่ยวนำร่วระหว่างขดลวดได้ ก็จะสามารถควบคุมพฤติกรรมการเกิดครอสเรกจูเลชันได้ ซึ่งการวางขดลวดแบบ Stack4 จะลดค่าครอสเรกจูเลชันได้ดีกว่าแบบอื่นๆ เมื่อพิจารณาค่า *output résistance matrix* ซึ่งจากการทดลองสามารถยืนยันผลการวิเคราะห์ที่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมของค่าความเหนี่ยวนำร่วที่ส่งผลต่อค่าครอสเรกจูเลชันที่เกิดขึ้นในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงของการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาท์พุทหลักที่ส่งผลต่อเอาท์พุทย่อย ซึ่งสามารถสรุปเป็นแนวทางในการออกแบบการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อปรับปรุงค่าครอสเรกจูเลชันได้ดังนี้

- ควบคุมค่าความเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ I_{12}, I_{13} และ I_{14} ให้มีค่าน้อยๆ เพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อม โยงดีที่สุด
- ควบคุมค่าความเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดทุติยภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ I_{23}, I_{24} และ I_{34} ให้มีค่ามากๆ เพื่อลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างเอาต์พุทหลักกับเอาต์พุทย่อย เมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลง
- การวางตำแหน่งขดลวดของเอาต์พุทหลักควรวางใกล้แกนกลางของหม้อแปลงให้มากที่สุด เพื่อลดค่าความเหนี่ยวนำรั่วที่เกิดขึ้น
- ค่าความเหนี่ยวนำรั่วระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ ควรออกแบบให้มีค่าน้อยๆ และมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าความเหนี่ยวนำรั่วระหว่างขดลวดทุติยภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ ควรออกแบบให้มีค่ามากๆ และใกล้เคียงกัน

5.2.2 ผลการวิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากการพันแบบ Sandwich

การศึกษาพฤติกรรมการเกิดค่าความเหนี่ยวนำรั่วในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากการออกแบบหม้อแปลงแบบ Sandwich1 ถึง Sandwich5 ในแต่ละแบบจะจัดให้มีการวางตำแหน่งของขดลวด โดยมีการแบ่งขดลวดด้านปฐมภูมิแบบออกเป็นชั้นๆ แล้วนำไปวางแทรกกับขดลวดด้านทุติยภูมิ ดังภาพประกอบ 5-5

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการวัดในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง จากการออกแบบหม้อแปลงแบบ Sandwich จะอยู่ในรูปของแบบจำลอง Extended Cantilever เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมครอสเรกกูเลชันแสดงได้ดังตาราง 5-4



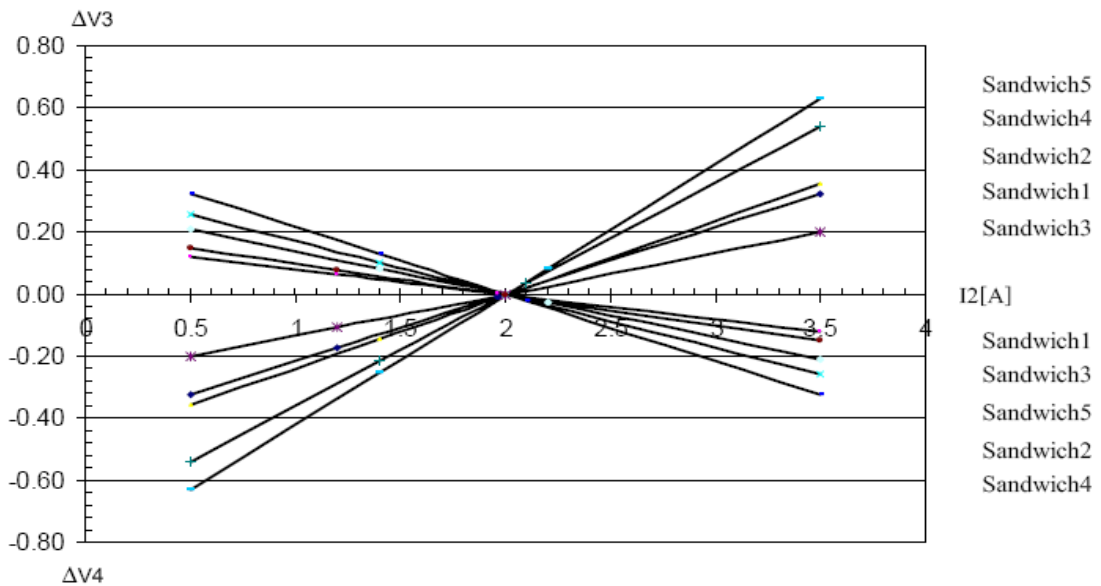
ภาพประกอบ 5-5 การเปรียบเทียบการออกแบบการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich

ตาราง 5-4 ค่าพารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich

Inductance parameter	Measure values				
	Sandwich1	Sandwich2	Sandwich3	Sandwich4	Sandwich5
n_2	0.144	0.132	0.14	0.142	0.14
n_3	0.282	0.34	0.3	0.28	0.3
n_4	0.288	0.336	0.3	0.28	0.3
L_{11}	296 μH	312 μH	290 μH	245 μH	267 μH
l_{12}	7.2 μH	6 μH	5.3 μH	4.9 μH	5 μH
l_{13}	4.6 μH	3.2 μH	3 μH	2.2 μH	2 μH
l_{14}	3.4 μH	3.3 μH	3.3 μH	3 μH	2.9 μH
l_{23}	13 μH	17 μH	26 μH	14 μH	12.4 μH
l_{24}	115 μH	32 μH	76 μH	36 μH	25 μH
l_{34}	6.3 μH	4.5 μH	4.7 μH	10.8 μH	10 μH

การทดสอบการวัดค่าความเหนี่ยวนำร่วมในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากการพันแบบ Sandwich พบว่าการวางตำแหน่งขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะมีความสัมพันธ์กับข้อสรุปจากการพันแบบ Stack คือขดลวดที่วางชิดกันจะเกิดค่าความเหนี่ยวนำร่วมน้อย และขดลวดที่วางห่างกันจะเกิดค่าความเหนี่ยวนำร่วมมาก ดังนั้นเมื่อมีการวางขดลวดปฐมภูมิใกล้กับขดลวดทุติยภูมิจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำร่วมเกิดขึ้นน้อย และการวางขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิห่างกันก็จะเกิดค่าความเหนี่ยวนำร่วมมาก ซึ่งหากพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำร่วมของการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich พบว่าค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ l_{12} , l_{13} และ l_{14} มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดทุติยภูมิกับทุติยภูมิ l_{23} , l_{24} และ l_{34} จะมีค่าแตกต่างกันมาก

ผลจากการนำเอาขดลวดปฐมภูมิไปแทรกไว้ระหว่างขดลวดทุติยภูมิกับทุติยภูมิ เมื่อทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาท์พุท จากการออกแบบหม้อแปลงแบบ Sandwich ทั้ง 5 แบบ เมื่อกระแสโหลดที่เอาท์พุทหลัก W_2 มีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.5-3.5A กระแสโหลดที่เอาท์พุทย่อย W_3 และ W_4 มีค่าคงที่ที่ 1A แสดงได้ในกราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาท์พุท ดังภาพประกอบ 5-6



ภาพประกอบ5-6 ผลการทดสอบค่าครอสเรกกูเลชันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบSandwich

จากการทดสอบกับวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำรั่วและค่าครอสเรกกูเลชัน ซึ่งหากพิจารณาการวางตำแหน่งขดลวดจากการพันขดลวดทั้ง 5 แบบ กับค่าความเหนี่ยวนำรั่ว และค่าครอสเรกกูเลชัน พบว่าการพันขดลวดแบบ Sandwich1 จะทำให้แรงดันของเอาต์พุตย่อย (W3) เกิดค่าครอสเรกกูเลชันน้อยที่สุด และการพันขดลวดแบบ Sandwich 3 จะทำให้แรงดันของเอาต์พุตย่อย (W4) เกิดค่าครอสเรกกูเลชันน้อยที่สุด เนื่องจากปัจจัยการควบคุมค่าความเหนี่ยวนำรั่วจากวิธีการวางตำแหน่งขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ดังนั้นวิธีการออกแบบเพื่อลดครอสเรกกูเลชันให้ได้มากที่สุด จึงควรควบคุมค่าความเหนี่ยวนำรั่วให้ได้ตามปัจจัยดังกล่าวให้มากที่สุด

การทดสอบหาค่าครอสเรกกูเลชันในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต โดยแสดงในรูปของแบบจำลอง output resistance matrix : \mathbf{R} ผลจากการทดสอบค่า *output resistance matrix* ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich1 ถึง Sandwich 5 แสดงได้ดังสมการ (5-8) ถึง (5-12)

$$\text{Sandwich1} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.37 & 0.24 & 0.21 \\ 0.23 & 1.01 & 0.51 \\ -0.08 & -0.34 & -0.73 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-8)$$

$$\text{Sandwich2} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.54 & 0.42 & 0.37 \\ 0.25 & 1.22 & 0.78 \\ -0.18 & -0.31 & -0.79 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-9)$$

$$\text{Sandwich3} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.39 & 0.25 & 0.23 \\ 0.21 & 1.05 & 0.57 \\ -0.08 & -0.36 & -0.78 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-10)$$

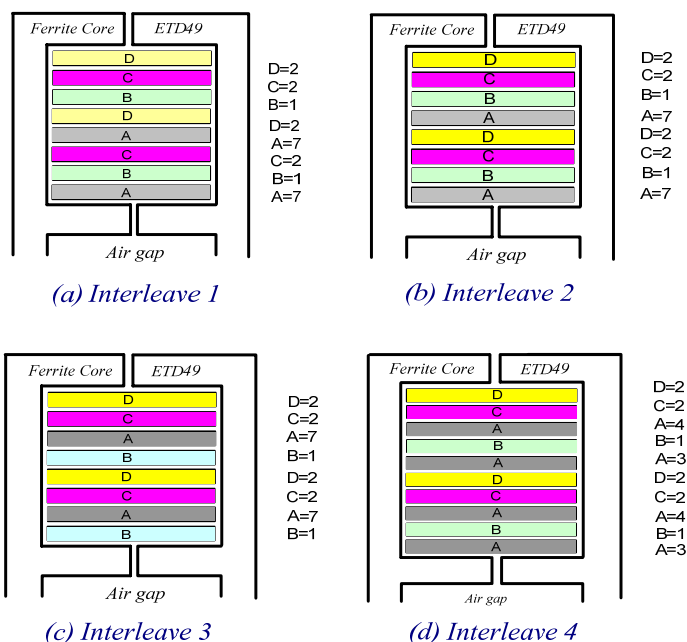
$$\text{Sandwich4} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.46 & 0.25 & 0.23 \\ 0.36 & 1.10 & 0.52 \\ -0.21 & -0.47 & -0.95 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-11)$$

$$\text{Sandwich5} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.57 & 0.53 & 0.32 \\ 0.43 & 1.42 & 0.95 \\ -0.15 & -0.47 & -0.93 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-12)$$

ผลการทดลองเมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ในเมตริก \mathbf{R} ที่อยู่นอกเหนือจากพารามิเตอร์ในแนวเส้นทแยงมุม ซึ่งแสดงค่าครอสเรกกูเลชันของแต่ละเอาต์พุต อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงกระแสของเอาต์พุตอื่นจากการพันหม้อแปลงทั้ง 5 แบบ พบว่าค่าที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำร่วมมาก หากพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะการพันกับการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต (W3) พบว่าการวางขดลวดแบบ Sandwich3 จะดีที่สุดและแบบ Sandwich5 จะแย่ที่สุด และหากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต (W4) พบว่าการพันแบบ Sandwich1 จะดีที่สุดและแบบ Sandwich4 จะแย่ที่สุด แต่จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าแรงดันเอาต์พุต (W3) ซึ่งเกิดจากการวางตำแหน่งขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

5.2.3 ผลการวิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากการพันแบบ Interleave

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave1 ถึง Interleave4 เพื่อศึกษาพฤติกรรมความเหนี่ยวนำร่วมในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งการออกแบบกำหนดให้มีการวางตำแหน่งขดลวดโดยแบ่งขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิเป็นชุดๆ แล้ววางสลับตำแหน่งกับขดลวดทุติยภูมิ ดังภาพประกอบ 5-7



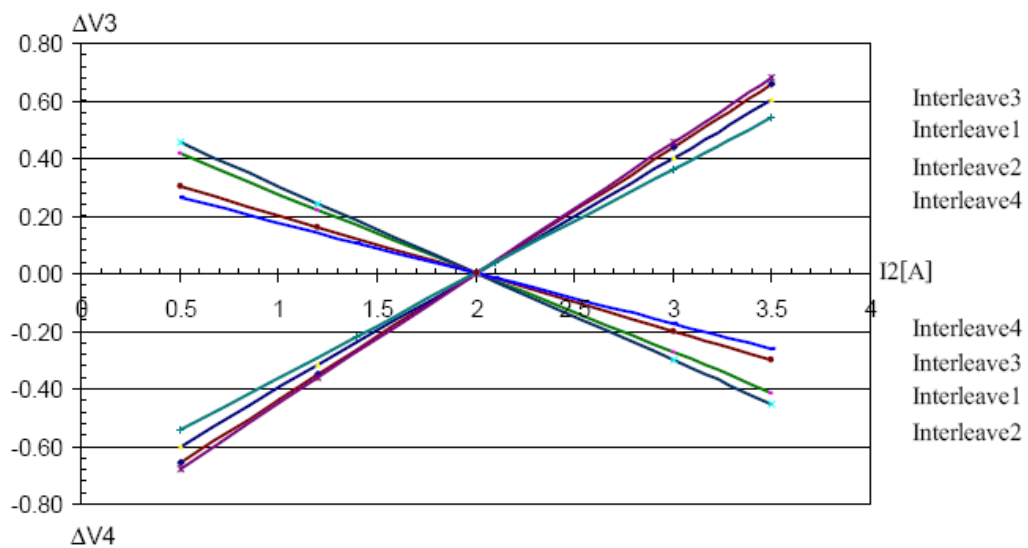
ภาพประกอบ 5-7 การเปรียบเทียบการออกแบบการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave

ผลจากการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง จากการพันหม้อแปลงแบบ Interleave1 ถึง Interleave4 แสดงได้ดังตาราง 5-5 ซึ่งพบว่า การพันหม้อแปลงแบบ Interleave ที่มีการกระจายขดลวดทั้งขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิจะสามารถลดค่าความเหนี่ยวนำรั่วได้ เพราะการกระจายขดลวดจะทำให้มีการลดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ผิวของลวดตัวนำ ทำให้เกิดค่าเหนี่ยวนำรั่วน้อย และหากยังมีการพันขดลวดในแบบ Interleave 4 ที่มีการกระจายของชั้นขดลวดมาก จะยิ่งส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำรั่วลดลง สำหรับผลการทดสอบการวัดค่าความเหนี่ยวนำรั่วในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากการพันแบบ Interleave แสดงดังภาพประกอบ 5-8

การทดสอบหาค่าครอสเรกจูแลชันในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาท์พุท โดยแสดงในรูปของแบบจำลอง output resistance matrix : \mathbf{R} ผลจากการทดสอบค่า output resistance matrix ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave1 ถึง Interleave 4 แสดงได้ดังสมการที่ (5-13) ถึง (5-16)

ตาราง 5-5 ค่าพารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำรั่วจากการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave

Inductance parameter	Measure values			
	Interleave1	Interleave2	Interleave3	Interleave4
n_2	0.144	0.144	0.144	0.14
n_3	0.29	0.29	0.29	0.29
n_4	0.29	0.29	0.29	0.29
L_{11}	310 μH	316 μH	326 μH	328 μH
l_{12}	16 μH	14 μH	11 μH	9.2 μH
l_{13}	3.3 μH	3 μH	3 μH	2.6 μH
l_{14}	5 μH	3.4 μH	4.2 μH	2.9 μH
l_{23}	88 μH	126 μH	156 μH	129 μH
l_{24}	53 μH	71 μH	97 μH	136 μH
l_{34}	5.8 μH	7.8 μH	10 μH	16 μH



ภาพประกอบ 5-8 ผลการทดสอบค่าครอสเรกดูเลชันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave

$$\text{Interleave1} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.52 & 0.34 & 0.35 \\ 0.43 & 1.44 & 0.98 \\ -0.27 & -0.56 & -1.06 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-13)$$

$$\text{Interleave2} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.28 & 0.67 \\ 0.40 & 1.21 & 0.26 \\ -0.31 & -0.45 & -0.89 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-14)$$

$$\text{Interleave3} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.48 & 0.29 & 0.33 \\ 0.45 & 1.46 & 0.85 \\ -0.21 & -0.52 & -0.92 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-15)$$

$$\text{Interleave4} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.47 & 0.21 & 0.25 \\ 0.36 & 1.2 & 0.81 \\ -0.17 & -0.32 & -0.89 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-16)$$

ผลการทดลองเมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ในเมตริก \mathbf{R} ที่อยู่นอกเหนือจากพารามิเตอร์ในแนวเส้นทแยงมุม ซึ่งแสดงค่าครอสเรกกูเลชันของแต่ละเอาต์พุต อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงกระแสของเอาต์พุตอื่นจากการพันหม้อแปลงทั้ง 4 แบบ พบว่าค่าที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำรั่วเช่นเดียวกับการพันแบบ Stack และแบบ Sandwich ซึ่งหากพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต (W3) และ เอาต์พุต (W4) ในการพันแบบ Interleave พบว่าการพันแบบ Interleave4 จะให้ผลดีที่สุด แต่ไม่ได้ดีกว่าการพันแบบ Sandwich 3 ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการจัดวางตำแหน่งเพื่อควบคุมค่าความเหนี่ยวนำรั่วของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

5.3 แนวทางการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อปรับปรุงครอสเรกกูเลชันในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิดหลายเอาต์พุต

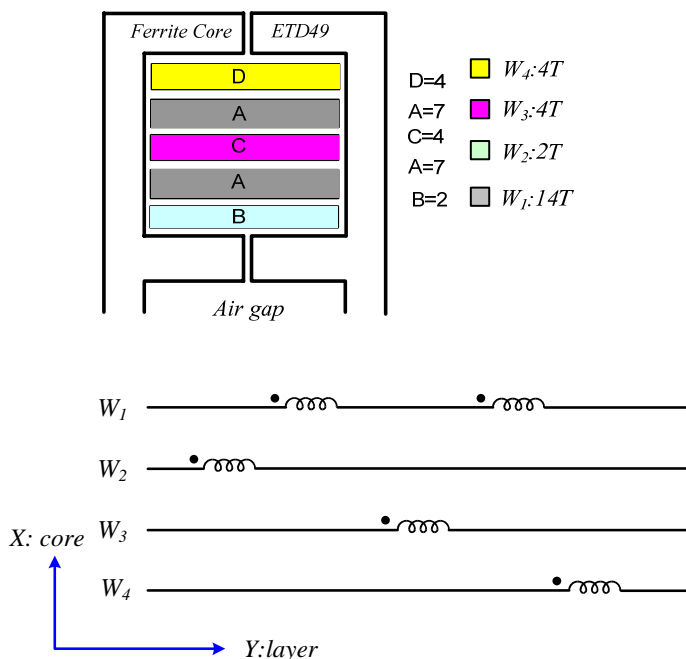
5.3.1 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อปรับปรุงครอสเรกกูเลชัน

จากผลการทดสอบการออกแบบการพันขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงที่ผ่านมา ทำให้ได้ทราบถึงผลกระทบและปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการเกิดครอสเรกกูเลชันของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต จึงได้นำผลดังกล่าวข้างต้นมาพิจารณาออกแบบการจัดวางตำแหน่งขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในแบบ Sandwich6 ดัง

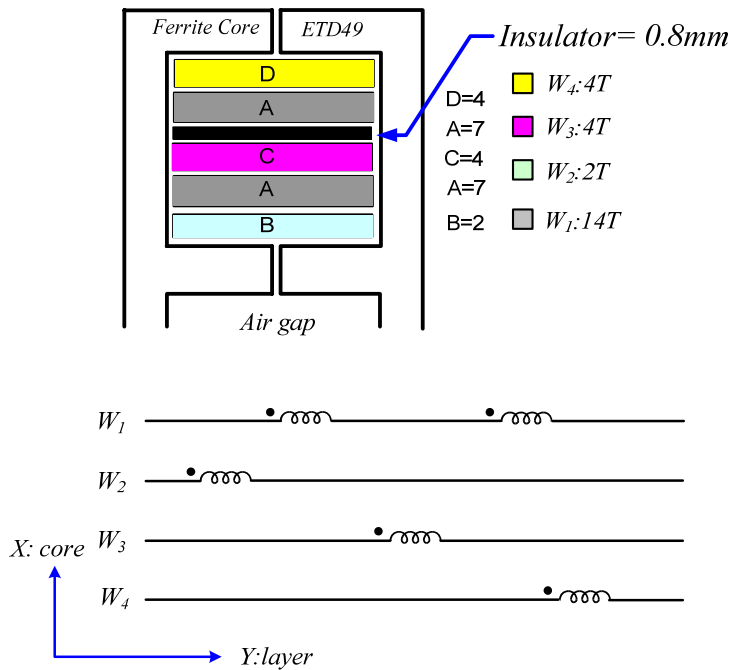
ภาพประกอบ 5-9 และในแบบ Sandwich7 ดังภาพประกอบ 5-10 ที่สามารถลดค่ากระแสรบกวนได้จากการควบคุมพฤติกรรมค่าความเหนี่ยวนำรั่วของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในแบบ Sandwich6 เป็นการออกแบบเพื่อควบคุมค่าความเหนี่ยวนำรั่วที่เกิดขึ้นในตัวหม้อแปลง โดยจัดวางขดลวดเพื่อให้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ (l_{12} , l_{13} และ l_{14}) มีค่าน้อยๆ และจัดให้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วระหว่างขดลวดด้านขดลวดทุติยภูมิกับทุติยภูมิ (l_{23} , l_{24} และ l_{34}) มีค่ามากๆ ซึ่งผลการทดลองสามารถควบคุมค่าความเหนี่ยวนำรั่วได้

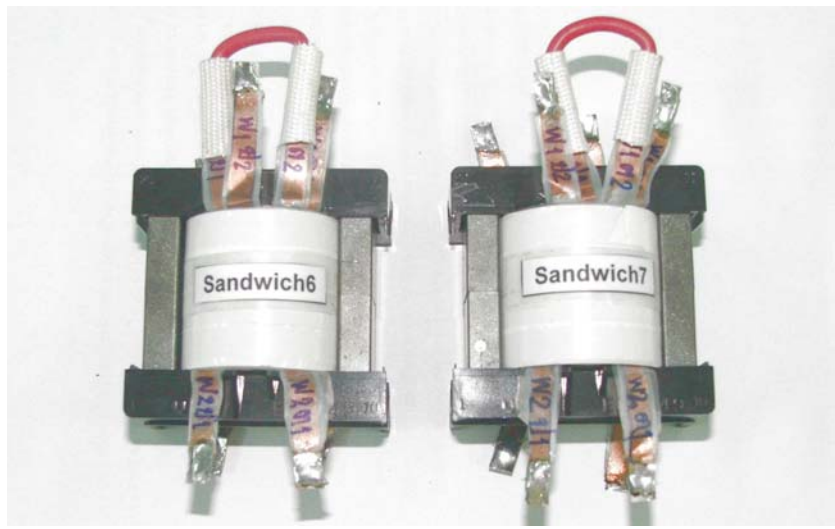
สำหรับการออกแบบหม้อแปลงแบบ Sandwich7 ที่มีการจัดวางตำแหน่งขดลวด และใช้แผ่นฉนวนหนา 0.8 มิลลิเมตร แทรกระหว่างขดลวด เพื่อควบคุมค่าความเหนี่ยวนำรั่วที่เกิดขึ้นในแต่ละกลุ่มให้มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากๆ โดยการจัดระยะของการวางขดลวดที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำรั่วที่เกิดขึ้นภายในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจากการทดลองแสดงดังตาราง 5-6



ภาพประกอบ 5-9 แบบการพันขดลวดแบบ Sandwich แบบที่ 6



ภาพประกอบ 5-10 แบบการพันขดลวดแบบ Sandwich แบบที่ 7



ภาพประกอบ 5-11 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich6 และ Sandwich7 เพื่อปรับปรุง
ครอสเรกดูเลชันในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาท์พุท

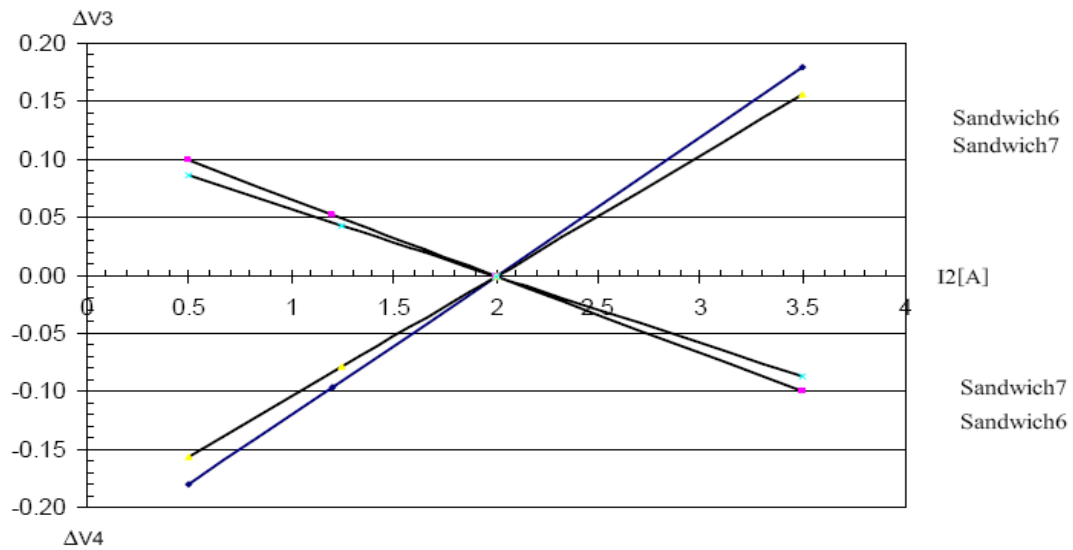
ตาราง 5-6 ค่าพารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำรั่วจากการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich6 และ Sandwich7

Inductance parameter	Measure values	
	Sandwich6	Sandwich7
n_2	0.14	0.14
n_3	0.29	0.29
n_4	0.29	0.29
L_{11}	304 μ H	290 μ H
l_{12}	5.3 μ H	5.3 μ H
l_{13}	3.1 μ H	3.1 μ H
l_{14}	3.5 μ H	3.6 μ H
l_{23}	187 μ H	209 μ H
l_{24}	196 μ H	276 μ H
l_{34}	38 μ H	86 μ H

5.3.2 ผลการเปรียบเทียบการปรับปรุงค่าครอสเรกกูเลชันของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

ผลการทดสอบการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงต่อการเกิดครอสเรกกูเลชันในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต เพื่อลดครอสเรกกูเลชันโดยการวางขดลวดแบบ Sandwich6 และ Sandwich 7 แสดงได้ดังกราฟเปรียบเทียบในภาพประกอบ 5-12 เมื่อกระแสเอาต์พุตหลัก W_2 มีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.5-3.5A และกระแสไหลดที่เอาต์พุตย่อย W_3 และ W_4 คงที่ที่ 1A

การทดสอบหาค่าครอสเรกกูเลชันในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต โดยแสดงในรูปแบบของแบบจำลอง output resistance matrix :**R** ผลจากการทดสอบค่า output resistance matrix ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich6 ถึง Sandwich7 แสดงได้ดังสมการที่ (5-15) ถึง (5-16)



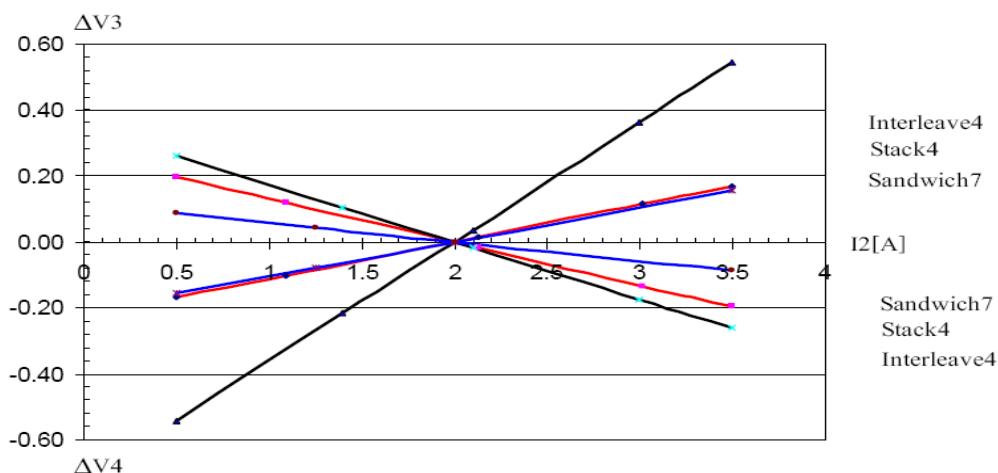
ภาพประกอบ 5-12 ผลการทดสอบการออกแบบการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich6 และ Sandwich7 ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอทพุท

$$\text{Sandwich6} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.36 & 0.13 & 0.12 \\ 0.11 & 1.20 & 0.66 \\ -0.09 & -0.21 & -0.59 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-15)$$

$$\text{Sandwich7} = \mathbf{R}_{\text{experiment}} = \begin{bmatrix} 0.40 & 0.12 & 0.11 \\ 0.10 & 0.96 & 0.38 \\ -0.09 & -0.20 & -0.63 \end{bmatrix} \Omega \quad (5-16)$$

ผลจากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อลดค่าครอสเรกกูเลชันในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิดหลายเอทพุท ซึ่งแสดงในรูปของแบบจำลอง *output resistance matrix* พบว่ามีความสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำรั่ว โดยการออกแบบ Sandwich6 ให้มีการวางขดลวดเอทพุทหลักติดกับแกนกลางหม้อแปลง เพื่อลดค่าความเหนี่ยวนำรั่วจากปรากฏการณ์ความใกล้เคียง ซึ่งทำให้เกิดค่าเหนี่ยวนำรั่วระหว่างขดลวด W_1 กับ W_2 น้อยที่สุด โดยมีการแบ่งขดลวดปฐมภูมิ W_1 ออกเป็นชั้นๆ แล้วนำไปประกบติดกับขดลวดทุติยภูมิ W_3 และ W_4 ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วที่เกิดขึ้น (l_{12}, l_{13} และ l_{14}) มีค่าน้อย และให้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วระหว่างขดลวดทุติยภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ (l_{23}, l_{24}) มีค่ามากขึ้นแต่ค่าความเหนี่ยวนำรั่วในขดลวดชุด l_{34} ยังมีน้อย จึงต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขดลวดชุด W_3 และ W_4 ซึ่งมีความหนาของฉนวนแทรกไว้ในการ

ออกแบบ Sandwich7 โดยควบคุมค่าความเหนี่ยวนำรั่วชุด $I_{3,4}$ ให้มากขึ้น ดังค่ากราฟเปรียบเทียบ ผลการเกิดครอสเรกกูเลชันซึ่งสามารถลดค่าครอสเรกกูเลชันได้มากที่สุด เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา จึงแสดงกราฟเปรียบเทียบของการออกแบบหม้อแปลง ที่ดีที่สุดในแต่ละแบบซึ่งได้แก่ แบบ Stack4 แบบ Sandwich7 และแบบ Interleave4 ดังภาพประกอบ 5-13



ภาพประกอบ 5-13 ผลการทดสอบค่าครอสเรกกูเลชันจากการออกแบบการพันหม้อแปลง ความถี่สูงในแต่ละแบบ

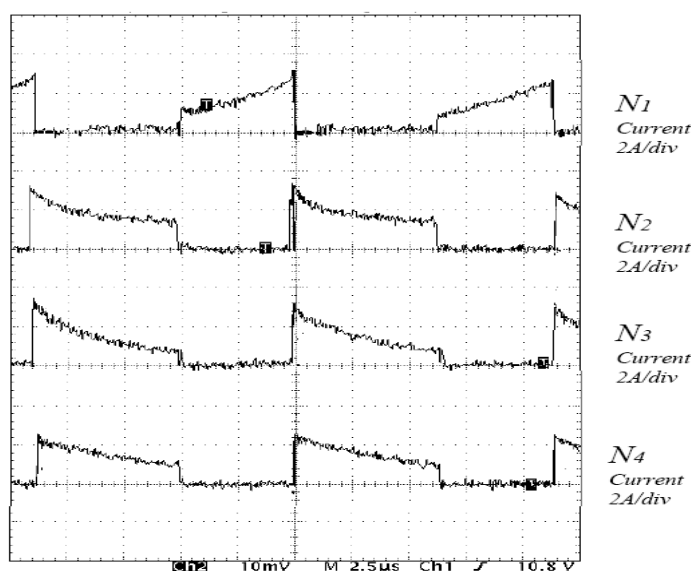
จากการทดสอบการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อปรับปรุงครอสเรกกูเลชันใน วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิดหลายเอาต์พุต พบว่าวิธีการที่เหมาะสมในการออกแบบ หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์คือ การลดค่าความเหนี่ยวนำรั่ว ระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับทุติยภูมิให้มีค่าน้อยที่สุด และจัดวางขดลวดด้านทุติยภูมิกับด้านทุติยภูมิ ให้มีค่าความเหนี่ยวนำรั่วมากที่สุด การวิเคราะห์พฤติกรรมที่ซับซ้อนของครอสเรกกูเลชันสามารถ อธิบายได้ด้วยแบบจำลอง Extended Cantilever ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ของค่าความเหนี่ยวนำรั่ว และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบหม้อแปลงฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ในพิกัดอื่นๆ

การวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากการออกแบบหม้อแปลงทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ แบบ Stack4 แบบ Sandwich7 และแบบ Interleave4 แสดงได้ดังตาราง 5-7

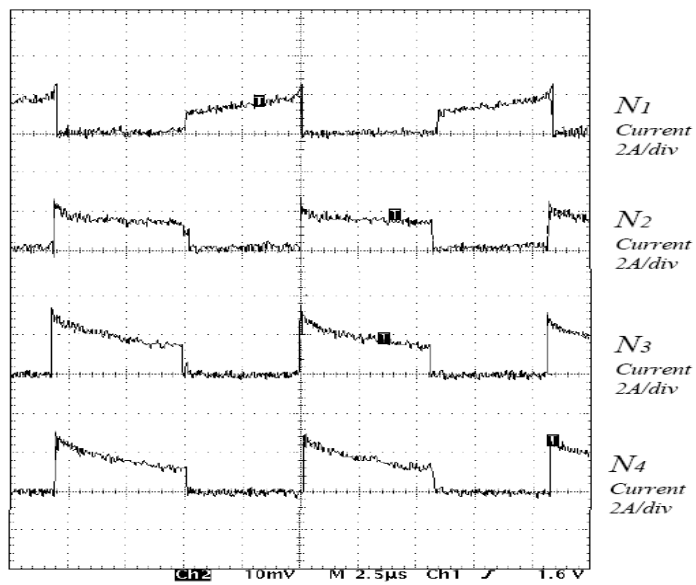
ตาราง 5-7 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

winding type	efficiency
Stack4	84%
Sandwich7	88%
Interleave4	83.6 %

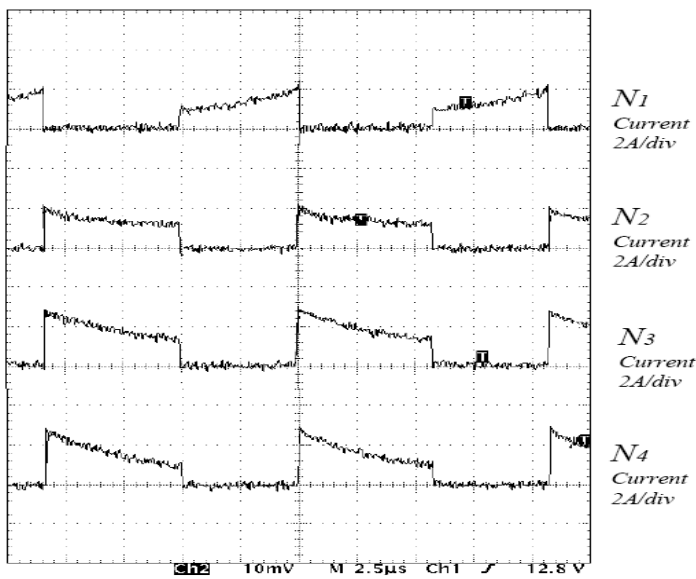
จากการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack4, Sandwich7 และ Interleave4 พบว่าค่าประสิทธิภาพมีความสัมพันธ์กับครอสเรกกูเลชันของวงจรฟลายแบคชนิด 3 เอาต์พุต โดยหม้อแปลงแบบ Interleave4 จะมีประสิทธิภาพต่ำสุด และเกิดครอสเรกกูเลชันมากที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับหม้อแปลงแบบ Stack4 และหม้อแปลงแบบ Sandwich7 จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด และเกิดครอสเรกกูเลชันน้อยที่สุด แสดงได้ดังรูปคลื่นกระแสอินพุตและกระแสเอาต์พุต เมื่อทดสอบที่กระแสเอาต์พุตหลัก I_{W_2} คงที่ ที่ 1A และกระแสโหลดที่เอาต์พุตย่อย I_{W_3} และ I_{W_4} คงที่ ที่ 1A ดังภาพประกอบ 5-14



ภาพประกอบ5-14 คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูงแบบStack4



ภาพประกอบ5-15 คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูงแบบSandwich7



ภาพประกอบ5-16 คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูงแบบInterleave4