

วงจรแก้ค่าตัวประกอบกำลังบนพื้นฐานของวงจรทบระดับร่วมกับ เซลล์ช่วยลดการสูญเสีย ในสวิตช์ชนิดพาสซีฟแบบ Non-MVS โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำร่วมกัน

The Coupled Inductor Lossless Passive Soft Switching Non-MVS Cells with Boost Converter for Power Factor Correction

ฉันทวุฒิ สุขสว่าง (Chantwut Zukzwang) *

ดร. อิศฎา บุญญารุณเนตร (Dr. Itsda Boonyaroonate) **

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวงจรแก้ค่าตัวประกอบกำลังบนพื้นฐานของวงจรทบระดับแรงดันที่มีการใช้ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงกันเพื่อให้สวิตช์ทำงานแบบซอฟต์สวิตช์ ซึ่งวงจรที่นำเสนอได้ปรับปรุงมาจากเซลล์วงจรช่วยลดการสูญเสียในสวิตช์ชนิดพาสซีฟแบบ Non-MVS โดยใช้การรวมตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ภายในวงจรทั้งหมด ซึ่งได้แก้ตัวเหนี่ยวนำทบระดับและตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ทั้งสองตัวมาพันร่วมกันไว้บนแกนแม่เหล็กเดียวกัน ทำให้จำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำ การสูญเสียและจำนวนของอุปกรณ์ในวงจรลดลงแต่ยังคงรักษาสถานะการสวิตช์แบบซอฟต์สวิตช์เช่นเดิม ผลการสร้างและทดสอบวงจรที่พิกัดกำลังงาน 700 วัตต์ การทำงานของวงจรที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ มีประสิทธิภาพการแปลงผันกำลังงานสูงสุด 94 เปอร์เซ็นต์ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.99 และความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสั่งเข้าเท่ากับ 2.4 เปอร์เซ็นต์

ABSTRACT

This research presented the coupled-inductor lossless passive soft switching boost converter for power factor corrected application. The proposed circuit is modified from the lossless passive soft switching methods with Non-Minimum Voltage Stress cell III by integrating the separated boost inductor and resonant inductors on one magnetic core. By using this method, the number is turn windings of inductors and the number of circuit components can be reduced, and the soft switching of main switch can be maintain from full load to open load. The Experimental results from 700 W prototype are given. The proposed circuit was operated at the 100 kHz switching frequency, power factor PF = 0.99, and the total current harmonic distortion $THD_i = 2.4\%$ and efficiency = 94% at full load.

คำสำคัญ : วงจรแก้ค่าตัวประกอบกำลัง วงจรทบระดับ ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง

Key Words : Power factor correction, Boost converter, Coupled inductor

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีต่างๆ ได้มีการพัฒนาไปกว่าเดิมมาก ไม่เว้นแม้แต่ด้านเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งก็รวมไปถึงการพัฒนาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์ซึ่งเพื่อรองรับเทคโนโลยีใหม่ๆ ด้านอิเล็กทรอนิกส์ โดยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์คือแหล่งจ่ายไฟตรงคงค่าแรงดันชนิดหนึ่งที่มีอาศัยหลักการทำงานของวงจรแปลงผัน (Converter) ซึ่งสามารถเปลี่ยนแรงดันไฟสลับจาก 220 โวลต์ให้เป็นแรงดันไฟตรงค่าต่ำ การพัฒนาในจุดนี้แล้วแต่มีจุดประสงค์หลักคือ ทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลง น้ำหนักเบาและราคาถูก ในขณะที่เดียวกันประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น ถึงแม้ว่าในวงจรแปลงผันจะใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งมีข้อดีและจุดเด่นในการแปลงผันพลังงาน แต่ก็มิใช่ว่าจะเสียหลายประการ เช่น การกำเนิดการสอดแทรกทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) และการกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกในสายส่งกำลัง

ในการทำงานของวงจรแปลงผันนี้ ในช่วงแรกของวงจรจะต้องมีการแปลงแรงดันไฟสลับให้เป็นแรงดันไฟตรงก่อน แล้วจึงนำแรงดันไฟตรงที่ได้ไปใช้งาน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะใช้วงจรเรียงกระแสแบบไดโอดบริดจ์ (Bridge Rectifier) (Erickson, 1997) แต่วงจรชนิดนี้จะส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor: PF.) ของกระแสสลับทางด้านขาเข้าของสายส่งไฟฟ้ามีค่าต่ำและทำให้เกิดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสขาเข้า (Total Harmonics Distortion: THD) ที่สูง ซึ่งส่งผลเสียต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นอย่างมากและนับวันโหดประเภทนี้ยังมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ทั้งทางอุตสาหกรรมและสำนักงานต่าง ๆ

จากปัญหาดังกล่าวได้มีการนำวงจรเรียงกระแสแบบสวิตซ์ (Switching Mode Rectifier : SMR) (Kandianis, Manias, 1994) แบบต่างๆ ขึ้นมาเพื่อใช้แก้ปัญหาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิกดังกล่าว แต่วงจรที่นำมาใช้ยังมี

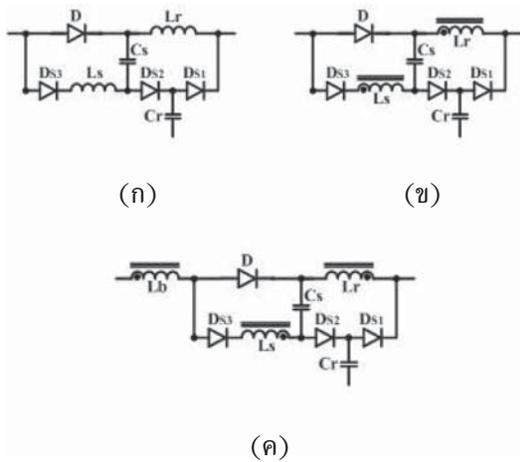
ประสิทธิภาพต่ำเพราะมีการสูญเสียของสวิตซ์กำลัง (Switching Loss) (Mohan และคณะ, 1995) ที่สูง มีการกำเนิดการสอดแทรกทางแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสอย่างรุนแรงขณะสวิตซ์ทำงาน (Hard Switching) ในงานวิจัยของ (Toshiya Yoshida และคณะ, 2000) ได้นำเสนอวิธีช่วยลดการสูญเสียในสวิตซ์กำลังโดยการทำงานจะอาศัยวงจรช่วยซึ่งประกอบด้วยวงจรเรโซแนนซ์และสวิตซ์ช่วย (Auxiliary Switch) แต่ข้อเสียที่ตามมาคือต้องมีวงจรควบคุมสวิตซ์ช่วยเพิ่มขึ้น ทำให้วงจรควบคุมรวมมีความยุ่งยากซับซ้อนมากขึ้นและเนื่องจากต้องใช้ทั้งสวิตซ์ช่วยกับวงจรเรโซแนนซ์จึงทำให้ราคาและจำนวนอุปกรณ์ของวงจรเพิ่มมากขึ้น ต่อมาในงานวิจัยของ (JrSmith, Smedley, 2002) ได้เสนอการใช้วงจรเรโซแนนซ์เพื่อช่วยลดการสูญเสียของสวิตซ์กำลัง ข้อดีคือวงจรไม่จำเป็นต้องใช้สวิตซ์ช่วยทำให้ช่วยลดความซับซ้อนในการควบคุมไปได้ ข้อเสียที่ตามมาคือภายในวงจรจะมีการเพิ่มเข้ามาของตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์สองตัวซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียในตัวนำและแกนเหล็กเพิ่มมากขึ้น ทำให้ในงานวิจัยของ (พฤษ์ และคณะ, 2548) ได้เสนอให้มีการพันตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ของวงจรใน (JrSmith, Smedley, 2002) ทั้งสองตัวมาพันไว้บนแกนแม่เหล็กอันเดียวกันเพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสของขดลวด

งานวิจัยนี้ได้แนะนำการปรับปรุงค่าประสิทธิภาพการแปลงผันกำลังงานและการลดขนาดของวงจรแปลงผันไฟสลับเป็นไฟตรง (AC-DC Converter) บนพื้นฐานของวงจรทบระดับแรงดัน (Boost Converter) ที่มีการแก้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ลดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสขาเข้าและมีการสูญเสียของสวิตซ์กำลังต่ำ โดยใช้วงจรทบระดับแรงดันร่วมกับเซลล์วงจรช่วยลดการสูญเสียในสวิตซ์ชนิดพาสซีฟ Non-MVS แบบที่ 3 (Lossless Passive Soft Switching with Non-Minimum Voltage Stress Cell III) (JrSmith, Smedley,

2002) โดยเสนอวิธีการรวมตัวเหนี่ยวนำที่มีอยู่ในวงจรทั้งสามตัวมาพันไว้บนแกนแม่เหล็กเดียวกัน ทำให้สามารถลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนและการสูญเสียที่เกิดจากการนำกระแสของขดลวดซึ่งประสิทธิภาพของวงจรที่นำเสนอดีกว่าวงจรก่อนปรับปรุง

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

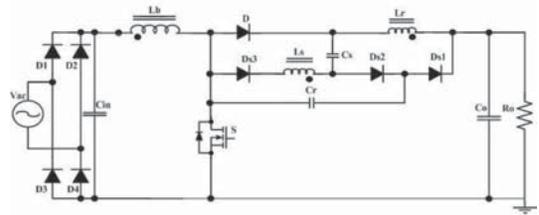
รูปแบบวงจร



รูปที่ 1 (ก) วงจรต้นแบบ
(ข) วงจรที่เสนอใน (พฤหัส และคณะ, 2548)
(ค) วงจรที่ปรับปรุง

รูปแบบของวงจรในรูปที่ 1(ก) เป็นวงจรต้นแบบของเซลล์วงจรช่วยลดการสูญเสียภายในสวิตช์ชนิดพาสซีฟ Non-MVS แบบที่ 3 (Jr. Smith, Smedley, 2001) ภายในวงจรประกอบด้วยไดโอด (D, D_{s1}, D_{s2} และ D_{s3}), ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ (C_s, C_r), และตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ (L_s, L_r) ซึ่งพันแยกกันอยู่ รูปที่ 1(ข) เป็นรูปแบบของวงจรที่ได้ปรับปรุงโดย (พฤหัส และคณะ, 2548) ที่เสนอถึงการนำตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ L_s และ L_r ทั้งสองมาพันไว้บนแกนแม่เหล็กเดียวกัน รูปที่ 1(ค)

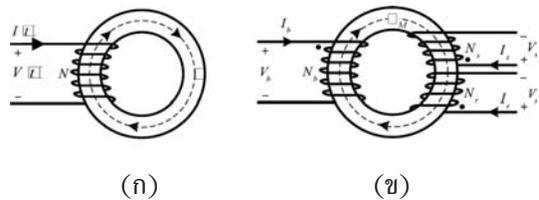
เป็นรูปแบบของวงจรที่ได้ปรับปรุง โดยจะมีการรวมตัวเหนี่ยวนำทระดับ L_b มาพันบนแกนเดียวกับตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ทั้งสองตัว และรูปที่ 2 เป็นรูปของวงจรที่นำเสนอ ซึ่งโครงสร้างของวงจรได้ใช้วงจรที่ปรับปรุงร่วมกับวงจรทระดับแรงดัน



รูปที่ 2 วงจรที่นำเสนอ

โครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ

จากเซลล์วงจรช่วยลดการสูญเสียในสวิตช์ชนิดพาสซีฟ Non-MVS แบบที่ 3 ในส่วนนี้จะอธิบายถึงลักษณะการพันตัวเหนี่ยวนำและวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้แกนแม่เหล็กร่วมกัน ในลำดับแรกจะต้องรู้ค่าความเหนี่ยวนำแต่ละตัวในกรณีที่ยังไม่ได้รวมแกนแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 3(ก) โดยในการวิเคราะห์จะกำหนดให้ $L_b = L_1, L_r = L_2, L_s = L_3, N_b = N_1, N_r = N_2$ และ $N_s = N_3$ ซึ่งจะได้ค่าความเหนี่ยวนำแต่ละตัวดังนี้



รูปที่ 3 โครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ

- (ก) กรณีแยกแกน
- (ข) กรณีรวมแกน

$$L_1 = \frac{N_1^2}{y} = \frac{N_1^2 m A_c}{l_m} \quad (1)$$

$$L_2 = \frac{N_2^2}{y} = \frac{N_2^2 m A_c}{l_m} \quad (2)$$

$$L_3 = \frac{N_3^2}{y} = \frac{N_3^2 m A_c}{l_m} \quad (3)$$

เมื่อ y คือ ความต้านทานแม่เหล็ก, l คือ ระยะยาวเฉลี่ยแกนแม่เหล็ก, m คือ ความซึมซาบแกนแม่เหล็ก, A_c คือ พื้นที่หน้าตัดแกนแม่เหล็ก, N คือ จำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำ

ในกรณีที่ตัวเหนี่ยวนำใช้แกนแม่เหล็กร่วมกัน แสดงดังรูปที่ 3(ข) ค่าความเหนี่ยวนำแต่ละตัวที่อยู่บนแกนเหล็กจะหาได้จากสมการที่ (4) ซึ่งเมื่อแทนค่าแล้วค่าความเหนี่ยวนำแต่ละตัวจะมีค่าเท่ากับสมการที่ (5) - (7)

$$L'_k = L_k + \sum_{j=1}^{j=N} \sum_{k,j=1}^{j=N} M_{kj} \frac{N_k}{N_j} \quad (4)$$

เมื่อ L'_k คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่ k , L_k คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่ k กรณีที่ยังไม่ได้มีการรวมแกนแม่เหล็ก, N_k คือ จำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำที่ขด k , N_j คือ จำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำที่ขด j , M_{kj} คือ ค่าของ Mutual Inductance ที่เกิดขึ้นระหว่างขด k และ j โดย M_{kj} จะมีค่าเท่ากับ M_{jk}

$$L'_1 = L_1 + M_{12} \frac{N_1}{N_2} + M_{13} \frac{N_1}{N_3} \quad (5)$$

$$L'_2 = L_2 + M_{21} \frac{N_2}{N_1} + M_{23} \frac{N_2}{N_3} \quad (6)$$

$$L'_3 = L_3 + M_{31} \frac{N_3}{N_1} + M_{32} \frac{N_3}{N_2} \quad (7)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) - (3) กับสมการที่ (5) - (7) จะพบว่าค่าความเหนี่ยวนำ L'_1, L'_2, L'_3 ในสมการที่ (5) - (7) จะมีค่ามากกว่าค่าความเหนี่ยวนำ L_1, L_2, L_3 ในสมการที่ (1) - (3) เนื่องจากในสมการที่ (5) - (7) จะมีเทอมของตัวแปร M คูณอยู่กับค่าอัตราส่วนของจำนวนรอบของขดลวดในแต่ละด้านเพิ่มเข้ามา ซึ่งในกรณีที่ต้องการพันตัวเหนี่ยวนำอยู่บนแกนเดียวกันเพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามต้องการ จะได้สมการการของค่าความเหนี่ยวนำแต่ละตัวใหม่ดังนี้

$$L_1 = L_1'' + M_{12} \sqrt{\frac{L_1''}{L_2''}} + M_{13} \sqrt{\frac{L_1''}{L_3''}} \quad (8)$$

$$L_2 = L_2'' + M_{21} \sqrt{\frac{L_2''}{L_1''}} + M_{23} \sqrt{\frac{L_2''}{L_3''}} \quad (9)$$

$$L_3 = L_3'' + M_{31} \sqrt{\frac{L_3''}{L_1''}} + M_{32} \sqrt{\frac{L_3''}{L_2''}} \quad (10)$$

เมื่อ N_1'', N_2'', N_3'' คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องพันลงบนแกนแต่ละด้าน L_1, L_2, L_3 คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการใช้งานจริง

จากสมการที่ (8) - (10) พบว่าถ้าต้องการค่าความเหนี่ยวนำในแต่ละด้านของแกนแม่เหล็กให้เท่ากับค่าความเหนี่ยวนำ L_1, L_2, L_3 ทำได้โดยการลดจำนวนรอบของการพันตัวเหนี่ยวนำ L_1'', L_2'', L_3'' ที่ต้องการพันบนแกนแม่เหล็กแต่ละด้าน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าของ Mutual Inductance: M โดยตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแกนทอรอยด์ (Toroid) ที่ใช้ และตารางที่ 2 แสดงจำนวนรอบและค่าความเหนี่ยวนำก่อนและหลังรวมแกนแม่เหล็ก

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของแกนทอรอยด์ (Toroid) ที่ใช้

Core Type	Cross Sect. Area (cm ²)	Mean Path Length (cm)	Relative Permeability (μ)
KST300-26	1.95	19.92	75

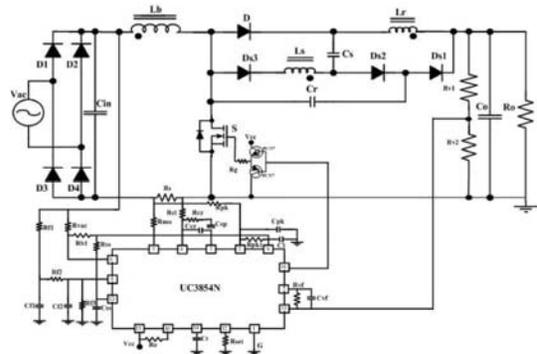
ตารางที่ 2 จำนวนรอบและค่าความเหนี่ยวนำก่อนและหลังรวมแกนแม่เหล็ก

ตัวเหนี่ยวนำ	ค่าความเหนี่ยวนำ (μH)	จำนวนรอบ	Mutual Inductance (μH)	
แยกแกน	L_1	500	98	0
	L_2	40	17	0
	L_3	20	12	0
รวมแกน	L_1'	215	51	$M_{12} = 39.12,$ $M_{13} = 26.45$
	L_2'	20	11	$M_{21} = 39.12,$ $M_{23} = 8.32$
	L_3'	10	7	$M_{31} = 26.45,$ $M_{32} = 8.32$

ผลการทดลอง

วงจรที่ใช้ในการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 4 โดยจะใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ UC3854N เป็นตัวควบคุมการทำงานของวงจรและแก้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้านาโหมตการคุมค่าเฉลี่ยของกระแส (Todd, 1999) โดยวงจรต้นแบบถูกออกแบบที่พิกัดกำลังงาน 700 วัตต์, แรงดันขาเข้า $V_{in} = 220 V_{rms}$, แรงดันขาออก $V_{out} = 360 V_{dc}$, ความถี่สวิตซ์ซึ่ง

$f_s = 100 \text{ kHz}$ ใช้ค่าของอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้ ตัวเหนี่ยวนำพระดับ $L_B = 500 \text{ uH}$, ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ $L_s = 40 \text{ uH}$, ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ $L_r = 20 \text{ uH}$ (กรณีรวมแกน ; $L_B = 215 \text{ uH}$, $L_s = 20 \text{ uH}$, $L_r = 10 \text{ uH}$, $M_{12} = M_{21} = 39.12 \text{ uH}$, $M_{13} = M_{31} = 26.45 \text{ uH}$, $M_{23} = M_{32} = 8.32 \text{ uH}$) ตัวเก็บประจุ C_s และ $C_r = 2 \text{ uF}$ และ 6.8 nF ตามลำดับ, ตัวเก็บประจุขาออก $C_o = 1,460 \text{ uF}$, สวิตซ์ $S = \text{IRFP460}$, ไดโอด D, D_{s1}, D_{s2} และ $D_{s3} = \text{HFA15TB60}$



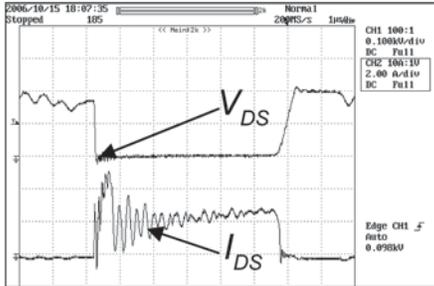
รูปที่ 4 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 5 แสดงรูปคลื่นของแรงดันที่ตกคร่อมสวิตซ์ S (VDS) และกระแสที่ไหลผ่านสวิตซ์ S (IDS) ก่อนและหลังรวมแกนแม่เหล็ก โดยรูปคลื่นที่ได้ทั้งสองกรณีมีลักษณะการทำงานคล้ายกันและยังคงมีการสูญเสียในสวิตซ์กำลังต่ำเหมือนกัน

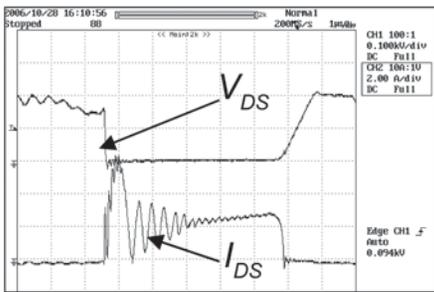
รูปที่ 6 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสทางด้านขาเข้าและขาออกของวงจรที่พิกัดกำลังงาน 700 วัตต์ โดยมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.99 ทั้งก่อนและหลังรวมแกนแม่เหล็ก

รูปที่ 7 แสดงค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสขาเข้าซึ่งวงจรที่ได้นำเสนอมีค่าเท่ากับ 2.4 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 8 แสดงกราฟกราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรก่อนและหลังการรวมแกนแม่เหล็ก

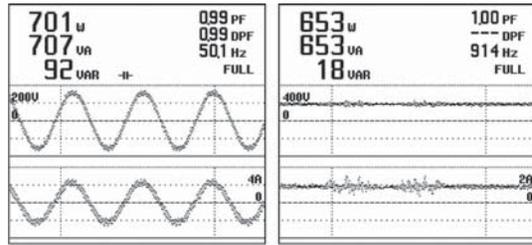


(ก) ก่อนรวมแกน



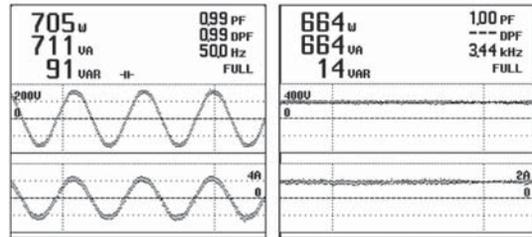
(ข) หลังรวมแกน

รูปที่ 5 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ S (V_{DS}) และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ S (I_{DS})



(ก)

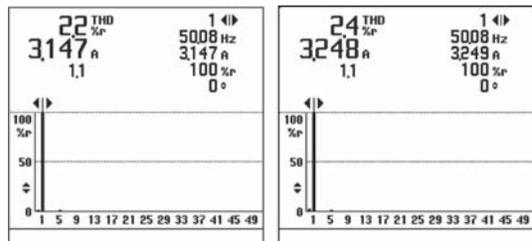
(ข)



(ค)

(ง)

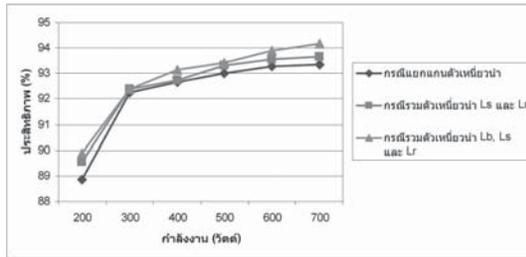
รูปที่ 6 ค่าตัวประกอบกำลัง, รูปคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านขาเข้าและขาออกของวงจร (ก)-(ข) กรณีแยกแกนแม่เหล็ก (ค)-(ง) กรณีรวมแกนแม่เหล็ก



(ก) กรณีรวมแกนแม่เหล็ก

(ข) กรณีแยกแกนแม่เหล็ก

รูปที่ 7 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสขาเข้า



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจร

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวงจรแก้ค่าตัวประกอบกำลังแบบวงจรทบระดับแรงดันที่มีการทำงานร่วมกับวงจรที่ปรับปรุงมาจากเซลล์วงจรช่วยลดการสูญเสียในสวิตช์ชนิดพาสซีฟเพื่อทำให้ความสูญเสียของสวิตช์กำลังมีค่าต่ำ โดยใช้การรวมตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ทั้งสองตัวและตัวเหนี่ยวนำทบระดับที่มีอยู่ในวงจรมาพันไว้บนแกนแม่เหล็กอันเดียวกันทำให้สามารถลดการสูญเสียจากการนำกระแสของขดลวดและแกนแม่เหล็กได้ แต่ยังคงมีการสูญเสียของสวิตช์กำลังต่ำเช่นเดิม ผลการสร้างและทดสอบวงจรที่พิกัดกำลังงาน 700 วัตต์ มีประสิทธิภาพการแปลงผันกำลังงานสูงสุด 94 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสขาเข้าเท่ากับ 2.4 เปอร์เซ็นต์และแก้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าด้านเข้าให้ใกล้เคียงหนึ่งได้

เอกสารอ้างอิง

พฤษ หทรงประกอบ, เอก ไชยสวัสดิ์, อุดมศักดิ์ ยั่งยืน และอิษฎา บุญญาอรุณเนตร, “วงจรแก้ค่าตัวประกอบกำลังบนพื้นฐานของวงจรทบระดับชนิดพาสซีฟชอฟต์สวิตซ์ซึ่งใช้ตัวเหนี่ยวนำร่วมกัน,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, 2548, หน้า 125-128.

Kandianis A. and Manias. S. N., 1994, “A Comparative Evaluation of Single-Phase SMR Converter with Active Power Factor Correction”, Power Electronics Specialists Conference, PESC’94 Record., 25th Annual IEEE, 20-25 June 1994, vol.1, pp. 369-374.

Erickson, R.W., 1997, “Fundamentals of Power Electronics”, Chapman & Hall, USA, pp. 541-550, 562-568.

Jr. Smith, K.M. and Smedley, K.M., 2002, “Engineering Design of Lossless Passive Soft Switching Methods for PWM Converters II with Non-minimum Voltage Stress Circuit Cells”, IEEE Transactions on Power Electronics, 28 November 2002, Vol. 17, pp. 864-873.

Mohan, N., Undeland, T.M. and Robbins, W.P., 1995, Power Electronics: Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons, New York, pp. 249 - 251.

Todd, P.C., 1999, UC3854 Controlled Power Factor Correction Circuit Design, Unitrode Product Applications Note, No. U-134, pp. 269-288.

Toshiya Yoshida, Osamu Shiizuka, Osamu Miyashita and Katsumi Ohniwa, 2000, “An Improvement Technique for the Efficiency of High-Frequency Switch-Mode Rectifiers”, Power Electronic IEEE Transactions on, Issue 6, Nov 2000, vol. 15, pp. 1118 - 1123.

Raman and Infrared Spectroscopic Studies of Divalent Cation Phosphate Hydrates Related to Saline Soil

การศึกษาฟอสเฟตไฮเดรตของแคตไอออน (II) ที่สัมพันธ์กับดินเค็ม โดยวิธีสเปกโทรสโกปีรามานและอินฟราเรด

Chanugorn Tabtimsai (ผอ.ศูนย์วิจัย) * Dr. Chanaiporn Danvirutai (ดร. โฉนพร ด้านวิรุทธ) **

Dr. Tipaporn Srithanratana (ดร. ทิพาภรณ์ ศรีธัญรัตน์) **

ABSTRACT

The intermolecular interaction in divalent cation phosphate hydrates related to saline soil were studied for $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (bobierrite) and $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (newberyite) that isostructure with $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (vivianite) and $\text{MnHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, by Raman and Infrared Spectroscopy and isotopic dilution technique. The observed OH stretching of water in phosphate hydrates and uncoupled ν_{OH} (HOD) vibration in D_2O condition lead to the estimation of the intermolecular distance between oxygen water and anion oxygen ($R_{\text{O...O}}$) and enthalpy of hydrogen bonding ($-\Delta H_{\text{H}}$) by using equation $R_{\text{O...O}} = 3.764 - 0.169 \ln \Delta \nu_{\text{OH}}(\text{HOD})/\text{cm}^{-1} \text{ \AA}$ and $-\Delta H_{\text{H}} = 1.286 + 0.0418 \Delta \nu_{\text{OH}}(\text{HOD})/\text{cm}^{-1} \text{ kJ/mol}$, respectively. The $R_{\text{O...O}}$ and $-\Delta H_{\text{H}}$ for $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, and $\text{MnHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ were found to be 2.730, 2.707, 2.790, and 2.799 \AA and -20.231, -23.297, -14.547, and -13.892 kJ/mol OH, respectively. The mole number of water of crystallization of octahydrate and trihydrate were studied by thermochemical and Karl-Fischer methods, and found to be 8 and 3 moles, respectively. The phosphate hydrates prepared from the variation of cation mole ratios; Fe(II)/Mg(II) and Mn(II)/Mg(II) in 5 categories, 1:1, 1:2, 1:3, 2:1 and 3:1 were studied. The data from FT-IR showed the spectrum characterized for $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $\text{MnHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $(\text{Mg}, \text{Mn})\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Moreover, the effects of ionic strength approximating salinity levels on the precipitation of compounds were investigated. Initial pH of the phosphate hydrates preparations were followed up for four salinity levels. It was found that the initial pH for those 4 phosphate hydrates is as follow: $S_{\text{ns}} < S_{\text{ss}} \approx S_{\text{ms}} \approx S_{\text{vs}}$.

*นักศึกษาคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สาขาวิชาเคมีฟิสิกัล คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

ได้ศึกษาอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลในฟอสเฟตไฮเดรตของแคตไอออน (II) ที่สัมพันธ์กับดินเค็ม โดยไฮเดรตที่ศึกษา คือ $Mg_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ (โบเบียร์ไรท์) และ $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$ (นิวเบอร์ไท์) ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกันกับ $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ (วิเวียไนท์) และ $MnHPO_4 \cdot 3H_2O$ ตามลำดับ ด้วยวิธีสเปกโทรสโกปีรามาน และอินฟราเรดและเทคนิคการเจือจางด้วยไอโซโทป ค่าความถี่การสั่นแบบยืดหดพันธะของหมู่ OH ของน้ำในฟอสเฟตไฮเดรตและการสั่นแบบไม่คู่ควบของหมู่ $OH(v_{OH} \text{ HOD})$ ที่อยู่ในสภาพแวดล้อม D_2O สามารถนำไปประมาณค่าระยะ $R_{O...O}$ ตามสมการ $R_{O...O} = 3.764 - 0.169 \ln \Delta v_{OH}(\text{HOD})/\text{cm}^{-1} \text{ \AA}$ และค่าเอนทัลปีของพันธะไฮโดรเจน ($-\Delta H_H$) ตามสมการ $-\Delta H_H = 1.286 + 0.0418 \Delta v_{OH}(\text{HOD})/\text{cm}^{-1} \text{ kJ/mol}$ พบว่าค่าระยะ $R_{O...O}$ และ $-\Delta H_H$ สำหรับ $Mg_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$, $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$, $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$ และ $MnHPO_4 \cdot 3H_2O$ เท่ากับ 2.730, 2.707, 2.790 และ 2.799 \AA และ -20.231, -23.297, -14.547, และ -13.892 kJ/mol OH ตามลำดับ จำนวนโมลน้ำในผลึกออกตะไฮเดรตและไตรไฮเดรตศึกษาโดยอาศัยสมบัติทางความร้อนและวิธีคาร์ล - พิชเซอร์ พบว่ามีจำนวนโมลน้ำในผลึกมีค่าเป็น 8 และ 3 ตามลำดับ ลักษณะการเกิดฟอสเฟตไฮเดรตจากแคตไอออนผสมตามการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนจำนวนโมล Fe(II)/Mg(II) และ Mn(II)/Mg(II) ใน 5 สัดส่วนคือ 1:1, 1:2, 1:3, 2:1 และ 3:1 จากข้อมูล FT-IR แสดงสเปกตรัมเอกลักษณ์สำหรับ $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$, $MnHPO_4 \cdot 3H_2O$, $(Mg, Fe)_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$, และ $(Mg, Mn)HPO_4 \cdot 3H_2O$ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของความแรงไอออนที่เป็นตัวกำหนดระดับความเค็มที่มีผลต่อการตกตะกอนของฟอสเฟตไฮเดรต จากนั้นติดตามการเปลี่ยนแปลง pH เริ่มต้นของการเตรียมฟอสเฟตไฮเดรตทั้ง 4 ชนิด แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า pH ดังนี้: $S_{ns} < S_{ss} \approx S_{ms} \approx S_{vs}$

คำสำคัญ : โบเบียร์ไรท์ นิวเบอร์ไท์ วิเวียไนท์

Key Words : Bobierite, Newberyite, Vivianite

Introduction:

The intermolecular interaction between water and ions or other molecules principally determine the structure and properties of the corresponding solid and liquid states. Solid hydrates are suitable for studying hydrogen bonding for their specific geometries. Hydrogen bonding is one of the most important interactions, playing an important role in many chemical processes. Vibrational spectroscopy (IR and Raman) are known to be the most powerful method for investigating hydrogen bonding and the structure of aqueous systems. Changes in the vibrational band provide the information about the structure of the associated

water molecules. The scope of this work will focus on the hydrogen bonding for ion-water interactions in phosphate hydrates of divalent cations namely magnesium, iron and manganese. The related local problem of salt affected soil in Northeast Thailand is the precipitation of iron and manganese phosphates. Some magnesium phosphate hydrates have the isostructural property related to selected hydrates Mn(II) and Fe(II), therefore Mg(II) phosphate hydrates are included in the study. Dryland salinization causes great impact to the economy and environmental problem in Northeast Thailand. The experimental conditions were carried out to represent the soil salinity levels.

Methodology:

The $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ was prepared by mixing 1.5 M $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and 1 M H_3PO_4 with the cation:anion mole ratio of 3:2. The solution was cooled in the ice bath and then added dropwise of 3 M NaOH with continuous stirring until the pH was 9. The obtained gel was allowed to stand for 24 h, filtered, and suspended in distilled water. After that 30 min of stirring was needed and allowed to stand for 24 h, filtered, and air-dried. The precipitates of $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ were prepared by adding 0.1 M $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ to a constantly stirred solution of 0.067 M K_2HPO_4 and neutralized to pH = 6.5 by using concentrated ammonium hydroxide. The precipitates were kept in contact with the mother liquor for 7 days without stirring. The solution pH was monitored daily and adjusted to pH = 6.5. After 7 days, the precipitates were filtered by suction pump and washed several times with deionized water. The precipitates were kept in the dessicator. The $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ was obtained by dropwise addition of equivalent moles of 0.5 M H_3PO_4 over an aqueous suspension of 0.5 M $\text{Mg}(\text{OH})_2$ tempered in an ice bath under continuous stirring about 1 h after the complete addition. The resulting suspension was vacuum-dried. The crystals of $\text{MnHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ were obtained by mixing 0.5 M $\text{MnCO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ with 0.5 M H_3PO_4 in the cation:anion mole ratio of 1:1. The solid was transferred to vial bottle and sealed with parafilm and kept in a dessicator. The deuterated analogues were prepared by using the D_3PO_4 instead of H_3PO_4 and K_2HPO_4 by the same method. The mole number of water of crystallization of the synthesized hydrates were determined by thermal analysis (TG/DTA, Perkin Elmer, Pyris Diamond),

gravimetric and Karl-Fischer method (Metrohm 798 MPT Titrino). The metal content in the synthesized hydrates were determined by atomic absorption spectrophotometry, (AAS, Perkin Elmer, Analyst 100). The precipitation of mixed two cations with isostructural properties $\text{Mg}(\text{II})/\text{Fe}(\text{II})$ and $\text{Mg}(\text{II})/\text{Mn}(\text{II})$ in 5 cation ratios namely 1:1, 1:2, 1:3, 2:1 and 3:1 were prepared. In order to simulate the experimental conditions close to the natural saline soil, sodium chloride were added to the reaction mixtures in various amounts corresponding to the salinity levels : non saline (S_{ns}), slightly saline (S_{ss}), moderately saline (S_{ms}) and very strongly saline (S_{vs}). The initial pH was monitored by pH measurement (SUNTEX pH/mV/TEMP. METER). The mid-IR vibrational spectra were recorded on an FTIR-FT Raman Spectrophotometer using KBr pellet and nujol mull technique. The vibrational bands were assigned and the uncoupled ν_{OH} HOD leads to the estimation of enthalpy of hydrogen bonding ($-\Delta H_{\text{H}}$), and $R_{\text{O}\dots\text{O}}$ distance.

Results and Discussion:

The results from FTIR spectra of $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $\text{MnHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, and $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ showed the characteristic peaks of vibrational and librational modes of H_2O , PO_4^{3-} and HPO_4^{2-} . The $R_{\text{O}\dots\text{O}}$ and $-\Delta H_{\text{H}}$ for $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, and $\text{MnHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ were found to be 2.730, 2.707, 2.790, and 2.799 Å and -20.231, -23.297, -14.547, and -13.892 kJ/mol OH, respectively. The results of TG/DTA, gravimetric and Karl-Fischer methods are in good agreement with 3 moles of water in $\text{MnHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$,

MgHPO₄•3H₂O whereas the water contents of Mg₃(PO₄)₂•8H₂O were found to be 8 moles for both TG/DTA with heating temperature range 30–800 °C and Karl–Fischer method. However 8 moles was found for Fe₃(PO₄)₂•8H₂O by Karl–Fischer method, which 7 moles by TG/DTA with the temperature program of 30–1000 °C. The complete elimination of water of this hydrate operated at higher temperature than 1000 °C. Atomic absorption spectroscopic technique provided the good agreements with 1 atom of metal per hydrate formula in MnHPO₄•3H₂O, MgHPO₄•3H₂O, meanwhile Mg₃(PO₄)₂•8H₂O and Fe₃(PO₄)₂•8H₂O 3 atoms per hydrate formula were obtained. The mixed phosphate hydrates data from FT–IR showed the spectrum characterized for Fe₃(PO₄)₂•8H₂O (Fe condition), MnHPO₄•3H₂O (Mn condition), (Mg, Fe)₃(PO₄)₂•8H₂O (Mg condition), (Mg, Mn)HPO₄•3H₂O (Mg condition). Initial pH of the phosphate hydrates showed the changing of pH in such away that

$$S_{ns} < S_{ss} \approx S_{ms} \approx S_{vs}$$

Conclusion:

The vibrational spectroscopic studies are very powerful method for determination of solid hydrates in terms of sample characterization, structural and bonding features.

This study, the intermolecular interactions in Mg₃(PO₄)₂•8H₂O Fe₃(PO₄)₂•8H₂O, MnHPO₄•3H₂O, and MgHPO₄•3H₂O are studied by using FTIR/ FT Raman spectroscopy. The frequency shift of ν_{OH} (HOD) leads to the estimated enthalpy of hydrogen bonding (–ΔH_H) and R_{O...O} distances.

The thermal properties of all hydrates were studied by using TGA/DTG/ DTA and DSC techniques. The mole numbers of crystallization water of these hydrates were characterized by using TGA/DTG/DTA and Karl – Fischer methods. The metal stoichiometry was determined by using atomic absorption spectroscopy (AAS). The mole numbers of crystallization water and metal content were used to confirm the empirical formula of each hydrate.

The effect of ionic strength on the precipitations of Mg₃(PO₄)₂•8H₂O Fe₃(PO₄)₂•8H₂O, MnHPO₄•3H₂O, and MgHPO₄•3H₂O and the mixed cation mole ratios; Fe(II)/Mg(II) and Mn(II)/Mg(II) were studied to predict the precipitation of iron and manganese phosphate hydrates that related to the ferrollysis process in Northeast, Thailand saline soils.

Acknowledgement:

The financial support from the Postgraduate Education and Research Program in Chemistry (PERCH) is gratefully acknowledged.

References:

- Aramendia, M.A. 1998. XRD and Solid–State NMR Study of Magnesium Oxide–Magnesium Orthophosphate Systems. *J. of Solid State Chemistry*. 135:96–102.
- Aramendia, M.A. 1999. Synthesis and Characterization of Magnesium Phosphates and Their Catalytic Properties in the Conversion of 2–Hexanol. *J. of Colloid and Interface Science*. 217:288–298.

- Bensalem, A. 1995. Ambient Pressure and Temperature Synthesis of New Layered Magnesium Phosphate: $\text{MgHPO}_4 \cdot 0.78\text{H}_2\text{O}$. *J. of Solid State Chemistry*. 114: 598-600.
- Buanam-Om, C. 1981. Raman and Infrared Spectroscopic Studies of the Structure of Water (H_2O , D_2O , HOD) in Stoichiometric Crystalline Hydrates and Electrolyte Solutions. Dissertation, Philipps-Universität Marburg, Mauerberg, Germany.
- Danvirutai C. in Arunin S. et al. 1989. Technology Development for Reclamation on Salt Affected Area in Northeast Thailand (USAID-RDI KKU).
- Frost, R. L., 2003. Dehydration of Synthetic and Natural Vivianite. *Thermochimica Acta*. 401: 121-130.