

### บทที่ 3

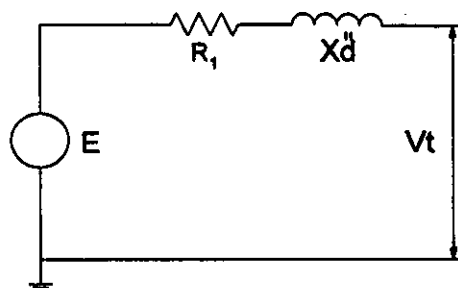
## แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง

สำหรับแบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้ตามแบบจำลองของ CIGRE [2] โดยที่คิดว่าจะระบบอยู่ในสถานะสมดุล ดังนั้นจึงคิดค่าต่างๆ เป็นค่าต่อเฟสทั้งหมด ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า [2]

การหาแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะต้องทราบค่าองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเช่นค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ ตามปกติแล้วในการกำหนดลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว ผู้ผลิตจะกำหนดค่าของแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตออกมา กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถรับโหลดได้ โดยจะบอกเป็นค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ( Apparent Power ) หรือกำลังไฟฟ้าจริง ( Active Power ) ส่วนค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น ก็สามารถดูได้โดยตรงที่แผ่นป้าย ( Name Plate ) โดยอาจบอกมาเป็นค่าต่อหน่วย ( Per Unit ) ที่เทียบกับขนาดของเครื่องกำเนิดเอง หรืออาจจะบอกมาเป็นค่าจริงในหน่วยโอห์มก็ได้

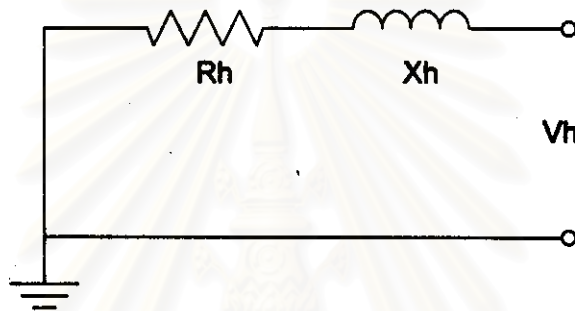
ดังนั้นในการหาแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์สร้างเมตริกซ์ความนำ  $Y_{BUS}$  จึงสามารถที่จะนำเอาค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์นี้ไปใช้ได้ แต่เนื่องจากว่าในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้มีจุดประสงค์ที่จะคำนวณวิเคราะห์ระบบที่ความถี่หลักมูล แต่ต้องการวิเคราะห์ระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิกเป็นหลัก ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงค่าที่ได้นี้ให้เป็นค่าที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการวิเคราะห์ด้วย



รูปที่ 3.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล

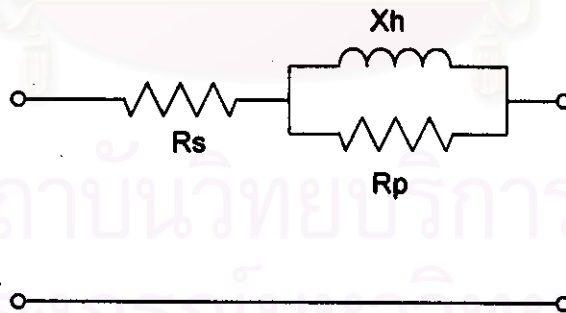
ค่าต่าง ๆ ในรูปที่ 3.1 นี้เป็นค่าที่ความถี่หลักมูล โดยค่าแรงดันที่ได้จากการผลิตแทนด้วย  $E$  และค่าความต้านทานที่ความถี่หลักมูล  $R_1 = 0.1X_1'$  ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแทนด้วยรีแอกแตนซ์ชั่วคราว (Subtransient reactance :  $X_1''$ )

เมื่อพิจารณาที่ความถี่ฮาร์มอนิก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสามารถแทนได้ด้วยค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่ฮาร์มอนิก  $X_h = hX_1'$  ส่วนค่าความต้านทานโดยปกติแล้วจะไม่ขึ้นกับความถี่แต่เนื่องจากผลของ Skin Effect จะได้ว่า  $R_h = \sqrt{h}R_1$  ส่วนค่า  $E$  ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ผลิตได้จะไม่มีที่ความถี่ฮาร์มอนิก ดังนั้นจะได้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิก

### 3.2 หม้อแปลงไฟฟ้า [2]



รูปที่ 3.3 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

แบบจำลองของหม้อแปลงตาม [2] คือ  $Z_n$  ดังรูปที่ 3.3 จะเห็นว่า สามารถแทนได้ด้วยค่าความต้านทาน  $R_s$  อนุกรมอยู่กับส่วนรวมของค่าความเหนี่ยวนำ  $X_h$  ที่ขนานอยู่กับค่าความต้านทาน  $R_p$  โดยที่  $X_h$  คือ Leakage Reactance ของหม้อแปลงที่ความถี่หลักมูลซึ่ง  $X_1$  สามารถคำนวณได้จากข้อมูลพิกัดของหม้อแปลง ดังนี้

$$Z_1 = \frac{\mu_w U_{rT}^2}{100\% S_{rT}} \quad (3.1)$$

$$R_1 = \frac{\mu_{Rr} U_{rT}^2}{100\% S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (3.2)$$

$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} \quad (3.3)$$

เมื่อ

$U_{rT}$  = แรงดันพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงสูงหรือแรงต่ำ

$I_{rT}$  = กระแสพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงสูงหรือแรงต่ำ

$S_{rT}$  = กำลังปรากฏพิกัดของหม้อแปลง

$P_{krT}$  = กำลังสูญเสียทั้งหมดในขดลวดของหม้อแปลงที่กระแสพิกัด

$\mu_w$  = แรงดันลัดวงจรพิกัด เป็นเปอร์เซ็นต์

$\mu_{Rr}$  = แรงดันโอห์มมิก (Ohmic Voltage) พิกัดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์

ดังนั้นจะได้ว่า

$$X_n = hX_1 \quad ; \quad R_s = \frac{X_1}{\tan \psi_1} \quad ; \quad R_p = 10 X_1 \tan \psi_1 \quad (3.4)$$

โดย  $\tan \psi_1$  [2] มีค่าดังนี้

$S_n$ (MVA)	$\tan \psi_1$
1	2
10	10
100	32

ตารางที่ 3.1 ค่า  $\tan \psi_1$  เทียบกับ  $S_n$

จากตารางที่ 3.1 ข้างบนสามารถที่จะแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$\tan \psi_1 = \exp[0.693 + 0.796 \ln S_n - 0.0421 (\ln S_n)^2] \quad (3.5)$$

โดยที่  $S_n$  คือ ขนาดกำลังพิกัดของหม้อแปลง

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ว่าการต่อขดลวดของหม้อแปลง มีผลต่อการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่เป็นตรีฟเฟสเปิดฮาร์มอนิก เนื่องจากฮาร์มอนิกลำดับดังกล่าวนี้เป็นเน็ทเวิร์คลำดับศูนย์ และลำดับนี้สามารถไหลวนอยู่ในวงรอบเดลตาได้ (Delta Circuit) แต่จะไม่ไหลออกไปรบกวนส่วนอื่นของระบบ ดังนั้นในการวิเคราะห์แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงต้องคำนึงถึงการต่อขดลวดด้วยว่าเป็น Y หรือ  $\Delta$  ดังรูปที่ 3.4

SYMBOLS	CONNECTION DIAGRAMS	ZERO - SEQUENCE CIRCUITS

รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของเน็ทเวิร์คลำดับศูนย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส [3]

ในขณะที่ลำดับฮาร์มอนิกที่ 5, 11, 17, ... เป็นเน็ทเวิร์คลำดับลบ (Negative Sequence Networks) และลำดับฮาร์มอนิกที่ 7, 13, 19, ... เป็นเน็ทเวิร์คลำดับบวก (Positive Sequence Networks)

กรณีที่ 1  $Y - Y, 1 \text{ Neutral Grounded}$  หากหม้อแปลงไฟฟ้ามีกาต่อจุดนิวตรอล (Neutral) ลงดินข้างเดียวกระแสลำดับศูนย์จะไม่สามารถที่จะไหลไปยังอีกข้างหนึ่งของหม้อแปลงได้ หมายความว่า เป็นวงจรเปิด ซึ่งแบบจำลองจะแทนด้วยอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงมาก

กรณีที่ 2  $Y - Y, \text{ Both Neutral Grounded}$  เมื่อทั้งสองข้างของหม้อแปลงมีการต่อนิวตรอลลงดิน กระแสลำดับศูนย์จะสามารถไหลข้ามไปยังอีกข้างได้ ดังนั้นแบบจำลองของหม้อแปลงระหว่างขดลวดทั้งสองจะแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณมาจากสมการที่ (3.4)

กรณีที่ 3  $Y - \Delta, \text{ Grounded Y}$  กรณีนี้กระแสลำดับศูนย์สามารถที่จะไหลลงดินได้โดยผ่านทาง  $Y$  เนื่องจากว่ากระแสนี้สามารถที่จะไปไหลวนอยู่ในวงรอบเดลตาได้ แต่จะไม่ออกไปยังระบบข้างนอก ดังนั้นตามรูปที่ 3.4 จะพบว่าวงจรสมมูลจึงมีทางให้กระแสไหลผ่านอิมพีแดนซ์  $Z_0$  และเป็นวงจรเปิดทางด้านเดลตา จึงแทนแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าในกรณีนี้ด้วยอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงมาก

กรณีที่ 4  $Y - \Delta, \text{ Ungrounded Y}$  เนื่องจากกระแสลำดับศูนย์ไม่สามารถที่จะไหลลงดินได้เปรียบเสมือนเป็นวงจรเปิด ดังนั้นจึงแทนแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าในกรณีนี้ด้วยอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงมาก

กรณีที่ 5  $\Delta - \Delta$  เนื่องจากไม่มีทางให้กระแสลำดับศูนย์ไหลได้ทั้งสองข้างของหม้อแปลง นอกเสียจากอาจจะมีกระแสที่ไหลวนอยู่ในวงรอบเดลตาเท่านั้น ดังนั้นจึงแทนแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าในกรณีนี้ด้วยอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงมาก

### 3.3 สายส่งพลังงานไฟฟ้า

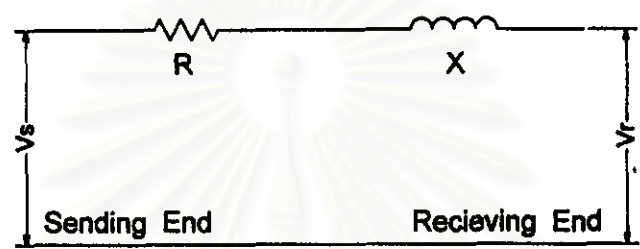
สำหรับสายส่งพลังงานไฟฟ้า ตามปกติจะมีการแบ่งประเภทของสายส่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. สายส่งระยะสั้น
2. สายส่งระยะปานกลาง
3. สายส่งระยะยาว

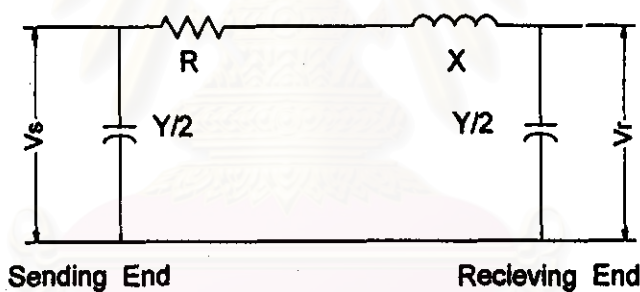
การเลือกประเภทของสายส่งเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณขึ้นอยู่กับความแม่นยำที่ต้องการ การคิดเป็นสายส่งระยะยาวจะมีความถูกต้องมากที่สุด เนื่องจากมีการคำนึงถึงค่าคาปาซิแตนซ์ที่กระจายตามความยาวของสายส่ง ส่วนสายส่งระยะปานกลางจะมีความถูกต้องรองลงมา โดยรวมเอาค่าคาปาซิแตนซ์ที่กระจายอยู่มารวมกันเป็นก้อน (Lump Parameter) สำหรับสายส่งระยะสั้นจะมีความถูกต้องน้อยที่สุด โดยคิดเพียงค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำเท่านั้น

ไม่คำนึงถึงค่าคาปาซิแตนซ์เลย ความจริงแล้วนอกจากค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าคาปาซิแตนซ์แล้ว ยังมีค่าความนำของสายส่งที่เป็นตัวแทนของกระแสรั่วลงดินของสายส่ง อีก แต่เนื่องจากว่ามีปริมาณน้อยจึงอาจละเลยไปได้

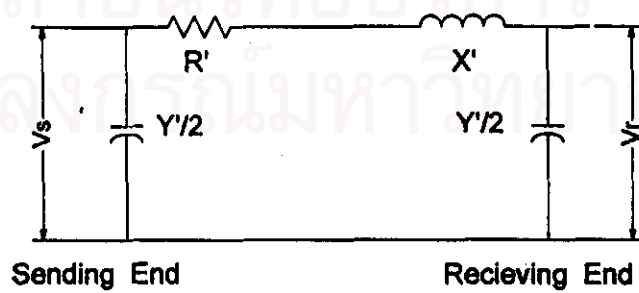
ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองตาม [2] ซึ่งให้แบบจำลองของสายส่งระยะยาวเป็นตัวแทนของสายส่งพลังงานไฟฟ้า โดยสายส่งระยะยาวมีแบบจำลองดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของสายส่งระยะสั้น



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของสายส่งระยะปานกลาง



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลของสายส่งระยะยาว

รูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 แสดงวงจรสมมูลของสายส่งระยะสั้นและระยะปานกลาง ส่วนวงจรสมมูลสำหรับสายส่งระยะยาวนั้นหากจะเขียนให้อยู่ในรูปลักษณะเดียวกับรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 จำเป็นต้องมีการแปลงค่าพารามิเตอร์ของสายส่งระยะยาวก่อน เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของสายส่งระยะยาวกระจายอยู่ทั่วไปตามความยาวของสายส่ง ดังนั้นถ้าจะเขียนค่าพารามิเตอร์ให้เป็นก้อน จึงต้องมีการแปลงค่าอิมพีแดนซ์ดังนี้

จากแบบจำลองรูป  $\pi$  ซึ่งมีความต้านทาน (R) และความเหนี่ยวนำ (X) ต่อแบบอนุกรม และมีคาปาซิเตอร์ (C) ต่อแบบขนาน จะได้ว่า

$$Z = R + jX \quad Y = j\omega C \quad (3.6)$$

เมื่อคิดผลของความยาวของสายส่งหรือเคเบิลแล้ว สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$Z' = \frac{Z \sinh \sqrt{YZ}}{\sqrt{YZ}} \quad \frac{Y'}{2} = \frac{Y \tanh \frac{\sqrt{YZ}}{2}}{\sqrt{YZ}} \quad (3.7)$$

ซึ่งเป็นการรวมเอาค่าพารามิเตอร์ของสายส่งที่กระจายไปตามความยาว มารวมกันเป็นก้อนเพื่อสะดวกในการแทนแบบจำลอง

ในกรณีที่คิดผลของ Skin Effect ด้วย ค่าความต้านทาน  $R_h$  จะหาจากค่าความต้านทานที่ 50 Hz ( $R_1$ ) โดยเทียบมาจากค่าความต้านทานไฟตรง ( $R_{dc}$ ) ดังนี้

$$R_{dc} = \frac{R_1 - 0.004398L}{0.938} \quad ; \quad x = 0.3545 \sqrt{\frac{h}{R_{dc}/L}} \quad (3.8)$$

เมื่อ L คือความยาวของสายส่ง เป็น กิโลเมตร (km.)

หาก  $x \leq 2.4$  จะได้

$$R_h = R_{dc} (0.035x^2 + 0.938) \quad (3.9)$$

หาก  $x > 2.4$  จะได้

$$R_h = R_{dc} (0.35x + 0.3) \quad (3.10)$$

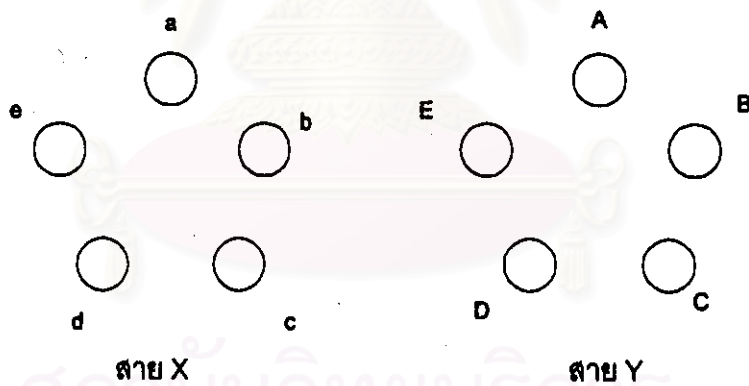
อนึ่ง ตามปกติของการส่งพลังงานไฟฟ้าที่ส่งไปตามสายเหนือศีรษะ นอกจากจะมีการซึ่งสายแบบเส้นเดี่ยวแล้ว ยังมีการเดินทางแบบสายควบ ( Bundle ) ด้วย และชนิดของสายก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่ทำให้คุณสมบัติของสายส่งต่างกัน ดังนั้นจึงควรเข้าใจวิธีการหาค่าความเหนี่ยวนำของสายส่งดังนี้

**การหาค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง [3]**

คำศัพท์ 2 คำที่สำคัญคือ

- Geometric Mean Distance ใช้ตัวย่อว่า  $D_m$  หรือ GMD หรือเรียกว่า Mutual GMD ระหว่างสายไฟสองสาย
- Geometric Mean Radius ใช้ตัวย่อว่า  $D_s$  หรือ GMR หรือเรียกว่า Self-GMD ระหว่างสายไฟเส้นย่อยเส้นเดียวกัน

ค่าความเหนี่ยวนำจะอยู่ในรูปของระยะ D ต่างๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการหาค่าความเหนี่ยวนำ

ตามรูปที่ 3.8 จะสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำของสาย X ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 D_m^{26} &= (D_{aA}D_{aB}\dots D_{aE})(D_{bA}D_{bB}\dots D_{bE}) \dots (D_{dA}D_{dB}\dots D_{dE}) \\
 D_s^{26} &= (D_{aa}D_{ab}\dots D_{ae})(D_{bb}D_{bb}\dots D_{be}) \dots (D_{dd}D_{db}\dots D_{de}) \\
 \text{จะได้} \quad L_x &= 2 \times 10^{-7} \ln (D_m / D_s) \quad \text{H/m} \tag{3.11}
 \end{aligned}$$

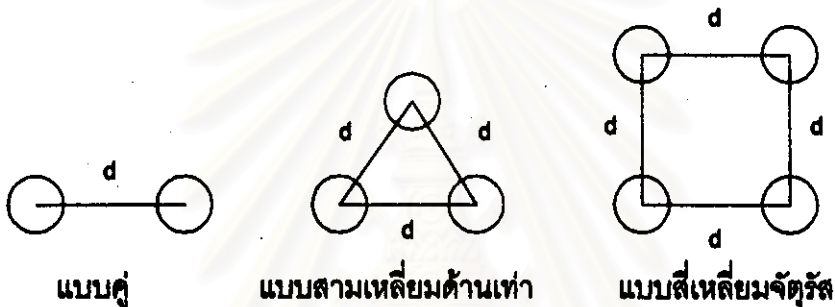


ทำนองเดียวกัน ค่าความเหนี่ยวนำของสาย Y ก็สามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน  
ฉะนั้น ค่าความเหนี่ยวนำของสายจะเป็น

$$L = L_x + L_y$$

$$X_L = 2\pi fL \quad (3.12)$$

สำหรับสายควบ จะต้องมีการปรับค่า  $D_s$  ดังนี้



รูปที่ 3.9 สายควบแบบต่าง ๆ

สมมติให้  $D_s'$  เป็นระยะ GMR ของสายควบ และ  $d_s$  เป็นระยะ GMR ของสายเดี่ยว

สายควบสองสาย  $D_s' = \sqrt{d_s \times d}$

สายควบสามสาย  $D_s' = \sqrt[3]{d_s \times d^2}$

สายควบสี่สาย  $D_s' = 1.09 \sqrt[4]{d_s \times d^3}$

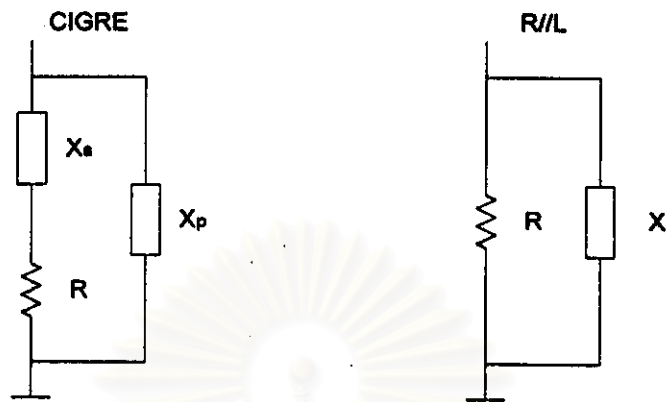
ส่วนค่าความต้านทานของสายส่งก็ขึ้นอยู่กับชนิดของสายส่งด้วยดังตารางที่ 3.2

การใช้สายส่งแบบสายควบ นอกจากจะมีผลทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงแล้ว  
ยังเป็นการลดค่าความต้านทานของสายส่งด้วย เพราะเปรียบเสมือนว่าเอาสายส่งมาต่อขนานกัน  
ความต้านทานย่อมลดลง ในที่นี้คิดว่าความต้านทานของแต่ละเส้นย่อยของสายส่งมีค่าเท่ากัน  
ดังนั้นสายควบแบบสองสายจะมีความต้านทานลดลงครึ่งหนึ่ง สายควบแบบสามสายก็จะมี  
ความต้านทานเป็นหนึ่งในสาม เป็นต้น

Code word	Resistance			GMR $D_s$ (ft)	Reactance per conductor 1-ft spacing, 60 Hz Inductive $X, \Omega/\text{mi}$
	DC 20°C $\Omega/1000 \text{ ft}$	AC 60 Hz			
		20°C $\Omega/\text{mi}$	50°C $\Omega/\text{mi}$		
Waxwing	0.3411	0.3488	0.3831	0.0198	0.397
Partridge	0.3379	0.3452	0.3792	0.0217	0.388
Ostrich	0.3004	0.3070	0.3372	0.0229	0.382
Merlin	0.2703	0.2767	0.3037	0.0222	0.385
Linnet	0.2677	0.2737	0.3006	0.0243	0.376
Oriole	0.2661	0.2719	0.2987	0.0255	0.371
Chickadee	0.2286	0.2342	0.2572	0.0241	0.377
Ibis	0.2270	0.2323	0.2551	0.0264	0.368
Pelican	0.1906	0.1957	0.2148	0.0264	0.368
Flicker	0.1896	0.1943	0.2134	0.0284	0.360
Hawk	0.1885	0.1931	0.2120	0.0289	0.360
Hen	0.1874	0.1919	0.2107	0.0304	0.353
Osprey	0.1632	0.1679	0.1843	0.0284	0.360
Parakeet	0.1626	0.1669	0.1832	0.0306	0.353
Dove	0.1621	0.1663	0.1826	0.0314	0.350
Rook	0.1420	0.1461	0.1603	0.0327	0.346
Grosbeak	0.1415	0.1454	0.1596	0.0335	0.343
Drake	0.1135	0.1172	0.1284	0.0373	0.333
Tern	0.1146	0.1188	0.1302	0.0352	0.338
Rail	0.0956	0.0997	0.1092	0.0386	0.329
Cardinal	0.0950	0.0988	0.1082	0.0402	0.325
Ortolan	0.0882	0.0924	0.1011	0.0402	0.325
Bluejay	0.0818	0.0861	0.0941	0.0415	0.322
Finch	0.0818	0.0856	0.0937	0.0436	0.317
Bittern	0.0718	0.0762	0.0832	0.0444	0.315
Pheasant	0.0713	0.0751	0.0821	0.0466	0.310
Bobolink	0.0639	0.0684	0.0746	0.0470	0.309
Plover	0.0634	0.0673	0.0735	0.0494	0.304
Lapwing	0.0576	0.0623	0.0678	0.0498	0.303
Falcon	0.0570	0.0612	0.0667	0.0523	0.298
Bluebird	0.0422	0.0476	0.0515	0.0586	0.287

ตารางที่ 3.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของสาย ACSR

### 3.4 โหลด



รูปที่ 3.10 แบบจำลองของโหลดตามแบบ CIGRE และแบบ R/L

CIGRE [2] แบบจำลองนี้จะใช้ได้ในช่วงความถี่ฮาร์มอนิกที่ 5 ถึงความถี่ฮาร์มอนิกที่ 20 จากรูปจะเห็นว่ามีส่วนเหนี่ยวนำ  $X_s$  อนุกรมอยู่กับความต้านทาน  $R$  จากนั้นทั้งหมดต่อขนานอยู่กับตัวเหนี่ยวนำ  $X_p$  ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ กำหนดดังนี้

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{U_{n.net}^2}{P_1} \\
 X_s &= 0.073hR \\
 X_p &= \frac{hR}{6.7 \tan \phi_1 - 0.74}
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 U_{n.net} &= \text{แรงดันปกติของระบบ} \\
 P_1 &= \text{กำลังไฟฟ้าแอกทีฟของโหลดภายใต้แรงดัน } U_{n.net} \\
 Q_1 &= \text{กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดภายใต้แรงดัน } U_{n.net} \\
 \tan \phi_1 &= Q_1/P_1
 \end{aligned}$$

R/L ตามแบบจำลอง [2] จะมีตัวต้านทานต่อขนานอยู่กับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งแบบจำลองนี้จะใช้เมื่อลำดับฮาร์มอนิกเกิน 20 ขึ้นไป จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{U_{n.net}^2}{P_1} \\
 X &= h \frac{U_{n.net}^2}{Q_1}
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

### 3.5 คาปาซิเตอร์ ( Capacitor )

วงจรมุมลของคาปาซิเตอร์สามารถแทนได้ด้วยค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์  $X_c$  โดยไม่คิดค่าความต้านทาน [9] ดังนั้นจะได้

$$X_c = -j \frac{1}{h\omega C} \quad (3.15)$$

เมื่อ  $X_c$  = ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่  $h$   
 $C$  = ค่าคาปาซิแตนซ์ของคาปาซิเตอร์  
 $h$  = ลำดับฮาร์มอนิก

### 3.6 ตัวกรองฮาร์มอนิก ( Filter ) [1]

ในกรณีที่เกิดปัญหาเรโซแนนซ์ระหว่างระบบกับคาปาซิเตอร์ที่ลำดับฮาร์มอนิกใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกผลิตออกมา ( ตามปกติคือลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 , 7 , 11 , 13 เป็นต้น ) ทำให้เกิดภาวะไหลตเกินทั้งกระแสและแรงดันที่ตัวคาปาซิเตอร์ การแก้ปัญหาวิธีหนึ่งที่ได้ผลแน่นอนนั้นคือการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิก ตัวกรองฮาร์มอนิกนี้ทำได้โดยการนำตัวเหนี่ยวนำหรือรีแอกเตอร์ ( Reactor ) ต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์ ตัวกรองฮาร์มอนิกจะทำหน้าที่ 2 ประการคือ

- 1) ให้กำลังไฟฟารีแอกตีฟที่ความถี่หลักมูลสำหรับการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง
- 2) ลดกระแสฮาร์มอนิก

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบ่งเป็น 2 แบบ ตามความถี่ที่ปรับตั้ง ( Tuned ) ไว้คือ

- ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบดีจูน ( Detune Filter )
- ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูน ( Tuned Filter )

ถ้าต้องการปรับตั้งให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ลำดับฮาร์มอนิก  $n$  ค่ารีแอกแตนซ์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$n = \sqrt{\frac{X_c}{X_r}} \quad (3.16)$$

$$X_r = X_c / n^2$$

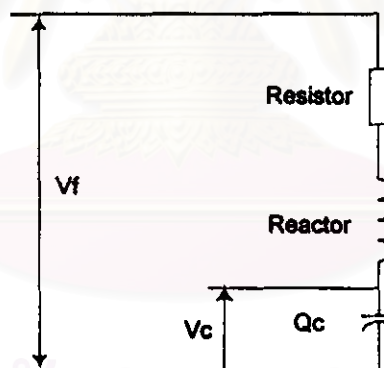
เมื่อต้องการให้กระแสฮาร์โมนิกไหลเข้าตัวกรองฮาร์โมนิกได้มากที่สุด ต้องปรับตั้งค่ารีแอกเตอร์ให้เกิดแรงดันรบกวนกับคาปาซิเตอร์ที่ตรงกับลำดับฮาร์โมนิกที่มีในระบบไฟฟ้าเช่น ลำดับฮาร์โมนิกที่ 5, 7, 11, 13 เป็นต้น ตัวกรองฮาร์โมนิกแบบนี้คือ ตัวกรองฮาร์โมนิกแบบจูนนั่นเอง

ค่ารีแอกแตนซ์ที่ลำดับฮาร์โมนิกต่าง ๆ มีดังนี้

ลำดับฮาร์โมนิกที่ 5	$X_R = 100 / 5^2 \% X_C = 4 \% X_C$
ลำดับฮาร์โมนิกที่ 7	$X_R = 100 / 7^2 \% X_C = 2.04 \% X_C$
ลำดับฮาร์โมนิกที่ 11	$X_R = 100 / 11^2 \% X_C = 0.83 \% X_C$
ลำดับฮาร์โมนิกที่ 13	$X_R = 100 / 13^2 \% X_C = 0.59 \% X_C$

โดยที่

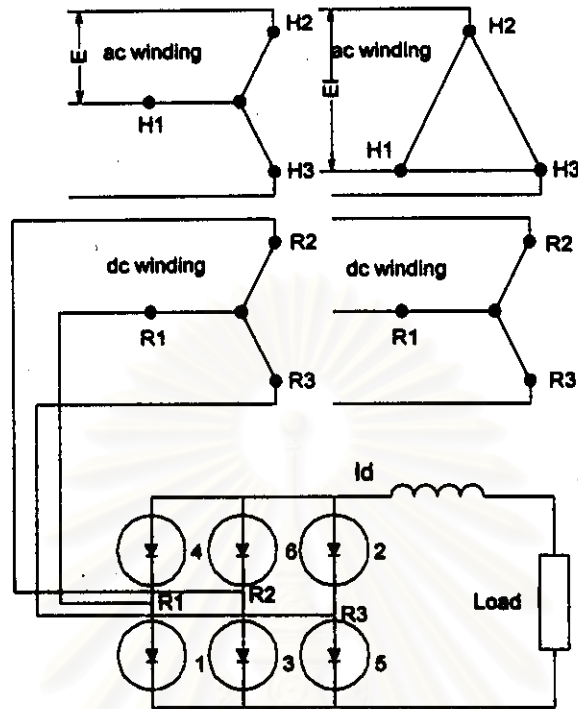
$$X_C = \frac{V_f^2}{Q_C} \quad (3.17)$$



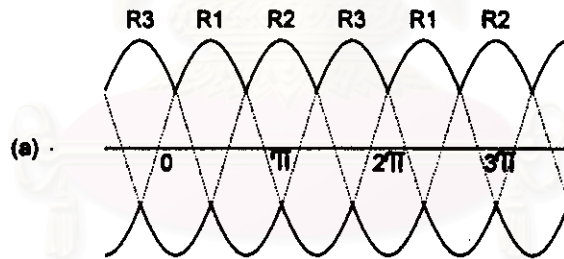
รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์โมนิก

### 3.7 คอนเวอร์เตอร์

คอนเวอร์เตอร์หรือเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกที่มีการใช้แพร่หลายมากที่สุด ซึ่งจะมีทั้งแบบที่เป็นจุดมคติและไม่เป็นจุดมคติ การเกิดกระแสฮาร์โมนิกขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดจากการที่กระแสมีรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนไป อันเป็นผลมาจากการปิดเปิดวงจรของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรเรียงกระแสของคอนเวอร์เตอร์ รูปที่ 3.12 แสดงวงจรเรียงกระแสกำลังสูงแบบจุดมคติ ซึ่งเป็นวงจรมาตรฐานของ IEEE [6]



รูปที่ 3.12 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส



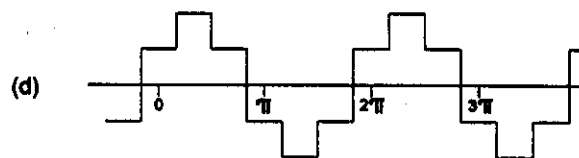
Transformer dc winding voltages



Current in rectifying elements



Current in dc winding R1



Line Current

รูปที่ 3.13 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสตามทฤษฎี [1]

วงจรเรียงกระแส 3 เฟส ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งมีการต่อหม้อแปลงแบบวาย - วาย จะให้รูปคลื่นกระแสและแรงดันดังรูปที่ 3.13 รูปคลื่นกระแสนี้อาจแยกออกเป็นรูปคลื่นหลายความถี่ โดยใช้การวิเคราะห์ฟูริเยร์ได้ดังสมการที่ (3.18) [1]

$$i = \sqrt{2} I_1 \left\{ \sin(\omega t) - \frac{1}{5} \sin(5\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) + \dots + \frac{2}{\sqrt{3}h} \cos\left(\frac{h\pi}{6}\right) \sin(h\omega t) + \dots \right\} \quad (3.18)$$

โดยที่  $I_1$  คือค่าประสิทธิภาพผลของกระแสที่ความถี่หลักมูล และ  $h$  คือลำดับฮาร์มอนิกวงจรเรียงกระแสรูปที่ 3.12 หากต่อผ่านหม้อแปลงเป็นแบบเดลตา - วาย จะให้รูปคลื่นกระแสดังรูปที่ 3.13(d) ในทำนองเดียวกันสามารถแยกรูปคลื่นกระแสนี้ออกเป็นรูปคลื่นหลายความถี่ดังสมการที่ (3.19)

$$i = \sqrt{2} I_1 \left\{ \sin(\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) + \dots + \frac{2}{\sqrt{3}h} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \sin(h\omega t) + \dots \right\} \quad (3.19)$$

รูปคลื่นกระแสที่ได้ตามรูปที่ 3.13 และสมการที่ (3.18) และสมการที่ (3.19) อยู่บนสมมติฐานว่าไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ไม่มีการกระเพื่อมเลย ดังนั้นจะได้องค์ประกอบของความถี่ฮาร์มอนิกของไฟฟ้ากระแสลับดังนี้

$$h = kq \pm 1 \quad (3.20)$$

และ

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (3.21)$$

- เมื่อ
- $h$  = เลขลำดับฮาร์มอนิก
  - $k$  = เลขจำนวนเต็มบวกใด ๆ
  - $q$  = จำนวนพัลส์ของวงจรเรียงกระแส
  - $I_h$  = ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่  $h$
  - $I_1$  = ขนาดของกระแสความถี่หลักมูล

วงจรเรียงกระแสทั้ง 2 แบบที่กล่าวมาแล้วใช้ไทรสเตอร์ 6 ตัว จึงเรียกว่าเครื่องเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ ( 6 - Pulse Rectifier ) จากสมการที่ (3.18) และสมการที่ (3.19) จะพบว่า มีรูปแบบคล้ายกัน ยกเว้นกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 , 7 , 17 , 19 , ... จะมีเครื่องหมายตรงกันข้าม ดังนั้นถ้าหากนำเอาเครื่องเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ 2 ชุดที่มีขนาดเท่ากันมาต่อขนานกัน กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 , 7 , 17 , 19 , ... จะหักล้างกันหมดไป จึงเรียกเครื่องเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ 2 ชุด นี้ว่า เครื่องเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์

การที่นำเอาเครื่องเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ หลายชุดมาต่อขนานกันเรียกว่า การทำเฟสมัลติพลิเคชัน ( Phase Multiplication ) ซึ่งสามารถทำได้หลายแบบดังนี้

- เครื่องเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ 2 ชุด รวมกันเป็น เครื่องเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์
- เครื่องเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ 3 ชุด รวมกันเป็น เครื่องเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์
- เครื่องเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ 4 ชุด รวมกันเป็น เครื่องเรียงกระแสแบบ 24 พัลส์

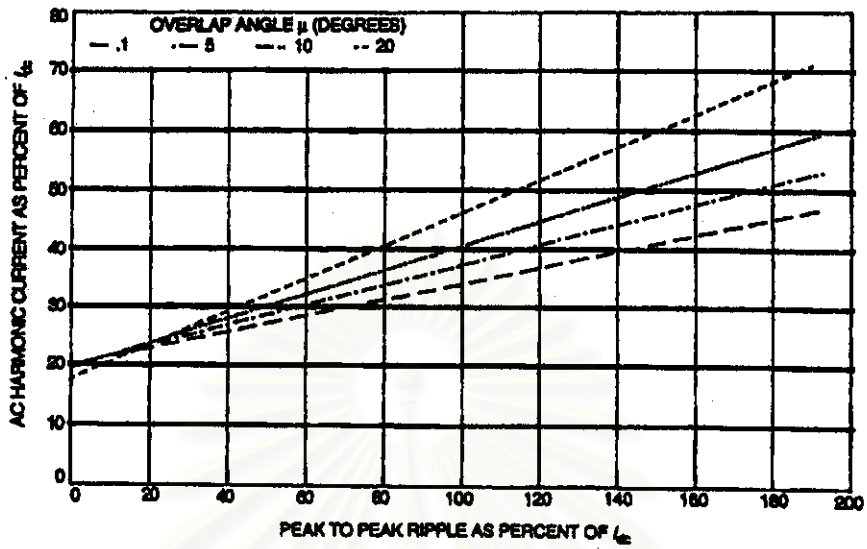
ดังนั้น หากต้องการลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้น สามารถทำได้โดยการทำเฟสมัลติพลิเคชัน ซึ่งมีเงื่อนไขดังนี้ ถ้ามีจำนวนเครื่องเรียงกระแส 6 พัลส์  $m$  ชุด

- 1) หม้อแปลงที่ใช้ต้องมีอัตราส่วนการแปลงที่เท่ากัน
- 2) หม้อแปลงที่ใช้ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากัน
- 3) การเคลื่อนเฟสของหม้อแปลงแต่ละตัวห่างกัน  $60/m$  องศา
- 4) เครื่องเรียงกระแสแต่ละชุดต้องถูกควบคุมด้วยมุมหนึ่งเท่ากัน
- 5) ต้องรับโหลดเท่ากันในแต่ละชุด

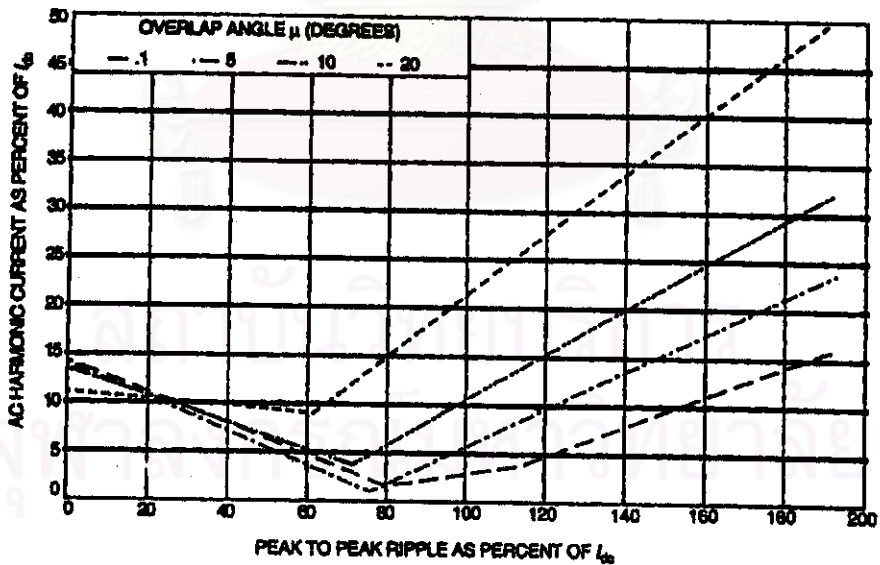
ในทางปฏิบัติแล้ว การทำตามเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นอาจทำได้ยาก เนื่องจากไม่มีเครื่องเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ใด ๆ 2 ชุดที่มีคุณสมบัติเท่ากันทุกประการ ดังนั้นกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นอาจเป็นกระแสฮาร์มอนิกที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติ นั่นคือจะได้คอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เป็นอุดมคติไปด้วย

ในรูปที่ 3.14 ถึงรูปที่ 3.17 แสดงถึงกรณีที่ใช้ไฟฟ้กระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสมีการกระเพื่อมปนอยู่ จะพบว่าขนาดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ จะไม่เป็นไปตามสมการที่ (3.21) แต่จะขึ้นอยู่กับการกระเพื่อมที่กระเพื่อมด้วย

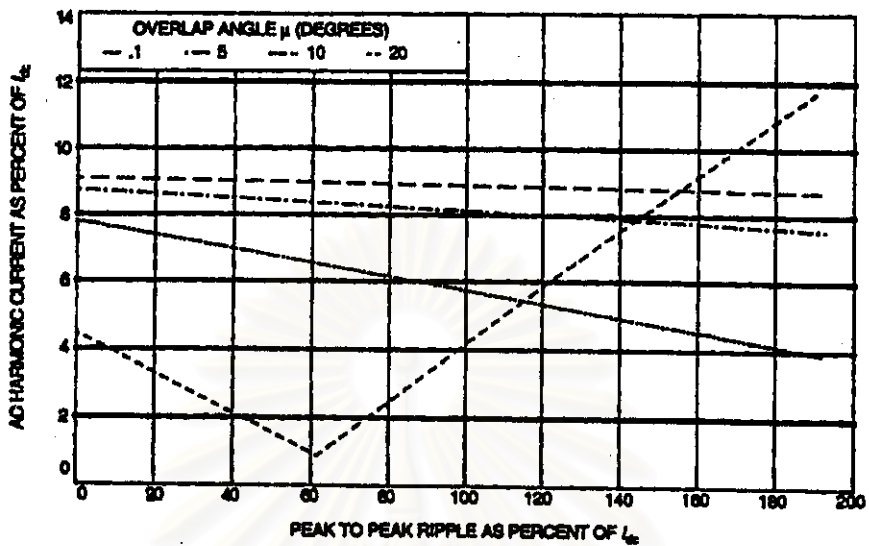




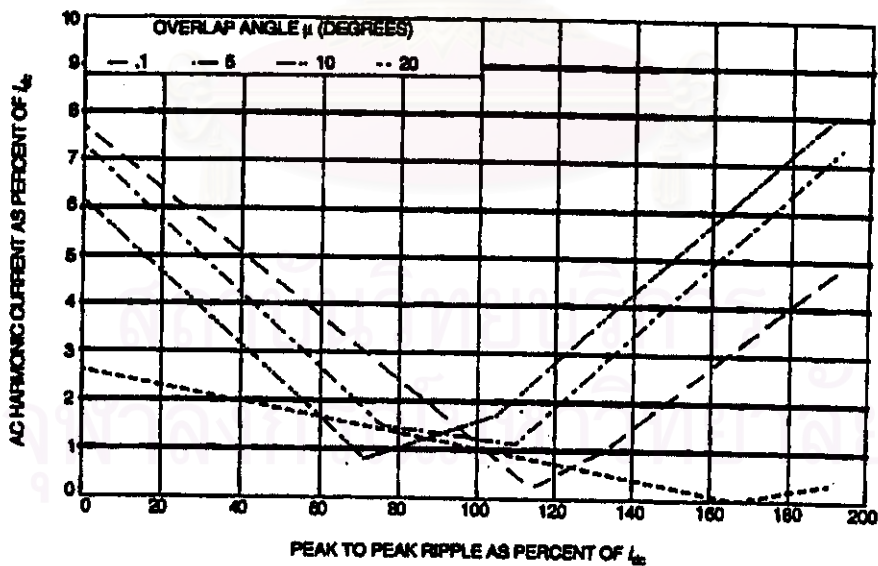
รูปที่ 3.14 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ในคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์  
ที่มีการกระเพื่อมของไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.15 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 ในคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์  
ที่มีการกระเพื่อมของไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.16 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 ในคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์  
ที่มีการกระเพื่อมของไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.17 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 13 ในคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์  
ที่มีการกระเพื่อมของไฟฟ้ากระแสตรง

ดังนั้น แบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นโหนดประเภทหนึ่ง จึงกำหนดให้วงจรสมมูล มีลักษณะเหมือนกับโหนดที่ความถี่หลักมูลคือมีตัวต้านทานขนานอยู่กับตัวเหนี่ยวนำ โดยที่ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำขึ้นกับกำลังไฟฟ้าพิกัดที่คอนเวอร์เตอร์ต้องการ ในขณะที่พิจารณาที่ความถี่ฮาร์มอนิก คอนเวอร์เตอร์จะเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกโดยไม่มีค่าอิมพีแดนซ์คือคิดเป็นแหล่งกำเนิดกระแสในอุดมคตินั่นเอง รูปที่ 3.18 จะแสดงวงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก