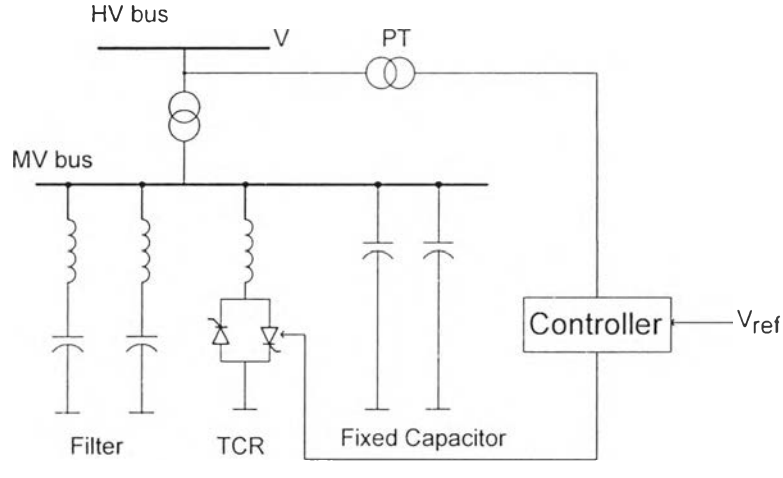
บทที่ 3

ทฤษฎีบทและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ SVC

ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีพื้นฐาน และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ SVC โดยกล่าวถึงโหมดการทำงาน แบบจำลองในสภาวะอยู่ตัว และแบบจำลองและการควบคุมเชิงพลวัตของอุปกรณ์

3.1 องค์ประกอบทางกายภาพของ SVC

องค์ประกอบหลักทางกายภาพของ SVC ที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำควบคุมด้วยไทริสเตอร์ (TCR) และตัวเก็บประจุค่าคงที่ (Fixed Capacitor: FC) หรือโดยรวมแทนด้วยสัญลักษณ์ TCR-FC โดยมีขนาดและจำนวนของอุปกรณ์แต่ละชนิดกำหนดตามความต้องการการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟให้กับระบบส่งกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบทางกายภาพของ SVC แบบ TCR-FC

รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพเส้นเดียวของการเชื่อมต่อ SVC ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า จะเห็นว่าในการใช้งานจริง สามารถนำตัวเก็บประจุค่าคงที่มาทำหน้าที่เป็นตัวกรองกระแสฮาร์มอนิคไปในตัวด้วย ส่วนประกอบอื่นที่จำเป็นได้แก่ หม้อแปลงแบบลดระดับแรงดัน แปลงแรงดันที่มีขนาดสูง ณ บัสที่ทำการติดตั้ง SVC ลงมาเป็นแรงดันขนาดปานกลางที่ SVC สามารถทำงานได้โดยไม่เกิดความเสียหาย และชุดควบคุมซึ่งรับค่าสัญญาณป้อนเข้าที่วัดมาจากระบบไฟฟ้าหลัก ผ่านหม้อแปลง

แรงดัน หรือหม้อแปลงกระแส โดยในรูปที่ 3.1 จะอ้างอิงถึงการวัดขนาดแรงดันจริงเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิงที่กำหนด เพื่อใช้ในการควบคุมต่อไป

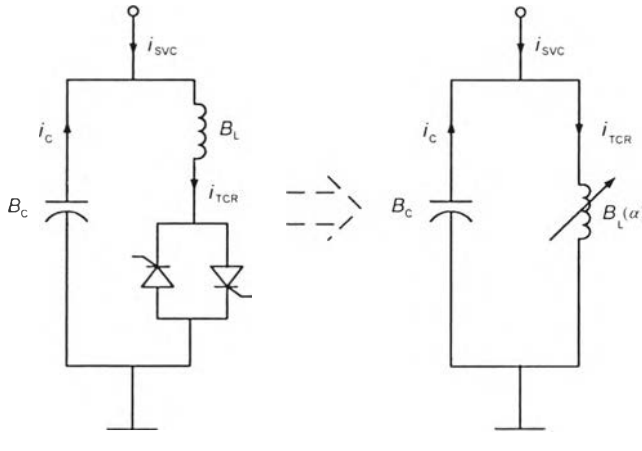
3.2 โหมดการทำงานพื้นฐาน

จากองค์ประกอบของ SVC ดังในรูปที่ 3.1 หากละเลยผลของไทริสเตอร์ ค่ารีแอคแตนซ์สุทธิของ SVC จะมีค่าคงที่อยู่ค่าหนึ่งซึ่งได้จากการขนานกันระหว่างตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ แต่เมื่อติดตั้งไทริสเตอร์เข้าไป และทำการควบคุมมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์ ทำให้สามารถควบคุม หรือปรับค่าซัสเซปแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ (B_L) ได้ เมื่อนำไปขนานกับตัวเก็บประจุค่าคงที่ก็จะทำให้ค่าซัสเซปแตนซ์สุทธิของ SVC หรือ B_{SVC} มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามโหมดการทำงานต่างๆ ดังนี้

3.2.1 โหมดการควบคุมแบบเชิงเส้น (Linear control range)

ในโหมดนี้เป็นการควบคุมมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์ให้ทำงานอยู่ในช่วงระหว่าง 90 องศา ถึง 180 องศา หรือ $\alpha \in (\frac{\pi}{2}, \pi)$ โดยมุมจุดชนวนนี้อ้างอิงจากมุมของแรงดันที่ตกคร่อมตัว SVC ณ จุดที่แรงดันมีค่าเป็นศูนย์และกำลังจะมีค่าเป็นบวก ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ($i_{TCR}(\alpha)$) เปลี่ยนแปลงค่าไปตามมุมจุดชนวน หรืออีกนัยหนึ่ง ส่งผลทำให้ค่าซัสเซปแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไป ($B_L(\alpha) = B_{TCR}$) ซึ่งแสดงได้ด้วยวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.2 โดยค่าซัสเซปแตนซ์ของ SVC จะมีค่าดังสมการที่ (3.1)

$$B_{SVC}(\alpha) = B_L(\alpha) + B_C \tag{3.1}$$

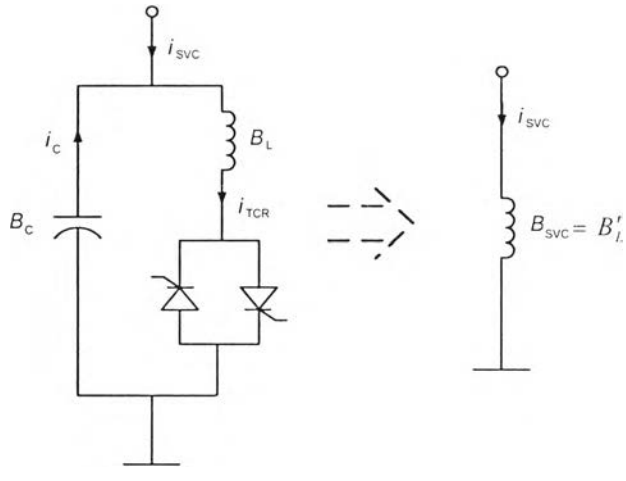


รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของ SVC ในโหมดการควบคุมแบบเชิงเส้น

3.2.2 โหมดขีดจำกัดตัวเหนี่ยวนำ (Inductive limit)

โหมดการควบคุมแบบนี้เป็นการควบคุมมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์ให้ทำงานที่มุม 90 องศาเพียงค่าเดียว ซึ่ง ณ ขณะนั้น TCR จะรับกระแสที่ไหลมาจากระบบกับกระแสที่ไหลมาจากตัวเก็บประจุค่าคงที่ ($i_{TCR} = i_{SVC} + i_C$) จนถึงค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุด $i_{TCR,max}$ ค่าซัสเซปแตนซ์ B_{TCR} มีค่าเท่ากับค่าซัสเซปแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่นำมาต่อร่วมกับตัวไทริสเตอร์ ทำให้ค่าซัสเซปแตนซ์รวมของ SVC ที่ระบบเห็นตอนนี้จึงเปรียบเสมือนกับตัวเหนี่ยวนำค่าคงที่ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว $B_L > B_C$ ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.3 และสมการที่ (3.2)

$$B_{SVC} = B_L + B_C = B'_L \tag{3.2}$$

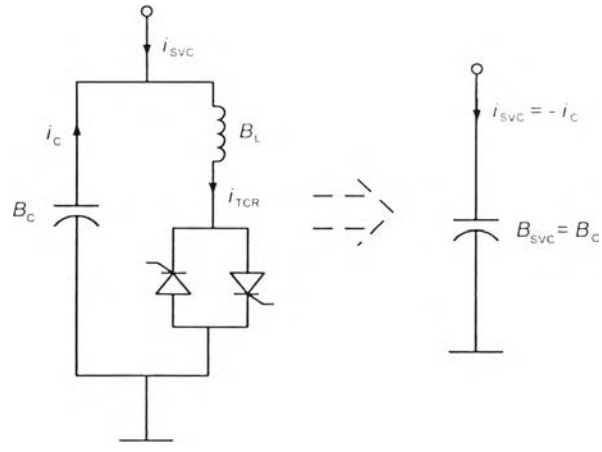


รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของ SVC ในโหมดขีดจำกัดตัวเหนี่ยวนำ

3.2.3 โหมดขีดจำกัดตัวเก็บประจุ (Capacitive limit)

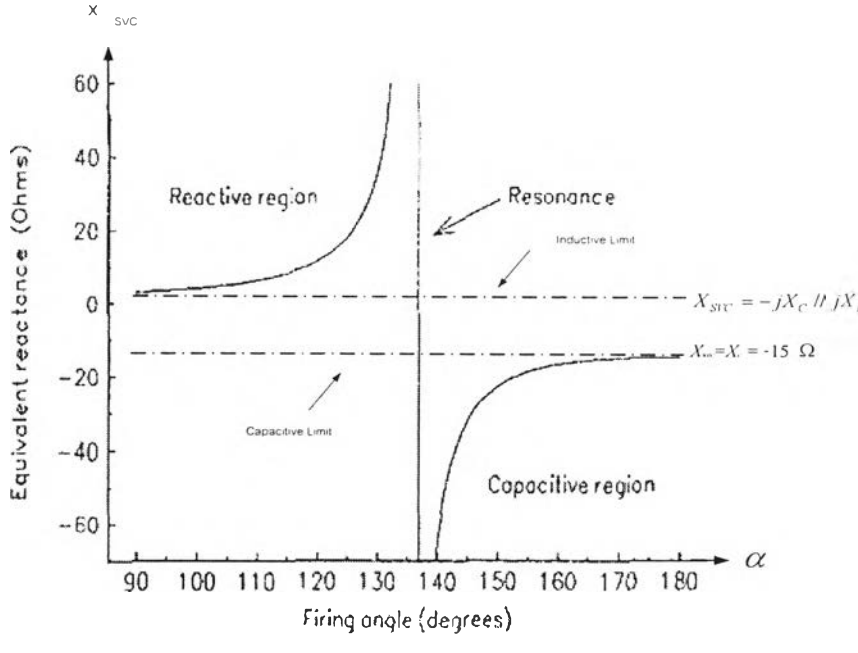
โหมดการควบคุมแบบนี้เป็นการควบคุมมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์ให้ทำงานที่มุม 180 องศาเพียงค่าเดียว ในโหมดการทำงานนี้จะไม่มีกระแสไหลผ่าน TCR เลย (สวิตช์เปิดวงจร) หรือ $i_{TCR} = 0$ ส่งผลทำให้ค่าซับเซบแตนซ์ $B_{TCR} = 0$ และค่าซับเซบแตนซ์รวมของ SVC ที่ระบบเห็นตอนนี้จึงเปรียบเสมือนกับตัวเก็บประจุค่าคงที่ โดยมีค่าดังสมการที่ (3.3) และแสดงวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.4

$$B_{SVC} = B_C \tag{3.3}$$



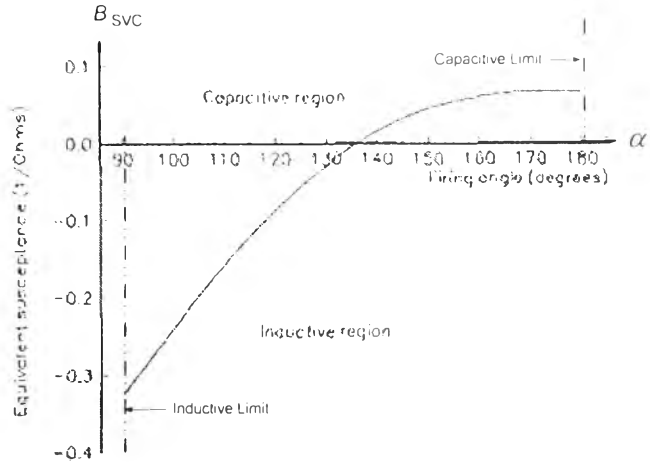
รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของ SVC ในโหมดขีดจำกัดตัวเก็บประจุ

จากโหมดการทำงานของ SVC ทั้ง 3 โหมดดังกล่าวข้างต้น ในสภาวะอยู่ตัวเราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารีแอคแตนซ์รวมของ SVC กับมุมจุดชนวน และระหว่างค่าซับเซบแตนซ์รวมของ SVC กับมุมจุดชนวนได้ดังรูปที่ 3.5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยในที่นี้ สมมุติให้ X_C = 15 Ω และ X_L = 2.56 Ω



(ก)

รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ของ SVC กับมุมจุดชนวน [7]
(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ารีแอคแตนซ์สุทธิของ SVC กับมุมจุดชนวน



(ข)

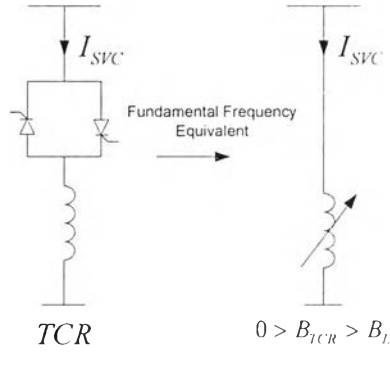
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ของ SVC กับมุมจุดชนวน [7]
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซัสเซปแตนซ์สุทธิของ SVC กับมุมจุดชนวน

3.3 คุณลักษณะการทำงานของ SVC

โดยทั่วไป ในการพิจารณาคุณลักษณะการทำงานของ SVC จะแสดงในรูปกราฟคุณลักษณะระหว่างแรงดันและกระแสสำหรับค่ามุมจุดชนวนที่แตกต่างกันออกไป

3.3.1 คุณลักษณะการทำงานของ TCR

1) <u>กรณีที่ไม่มีการควบคุมค่าแรงดัน</u> โครงสร้างพื้นฐานของ SVC ที่ประกอบด้วย TCR เพียงอย่างเดียว มีวงจรสมมูลแสดงได้ด้วยตัวเหนี่ยวนำปรับค่าได้ดังรูปที่ 3.6 การวิเคราะห์สมรรถนะของตัวชดเชยจะพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบที่ความถี่มูลฐาน เนื่องจากในทางปฏิบัติกระแสฮาร์มอนิคจะถูกกรองให้มีค่าต่ำ ๆ



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของ TCR

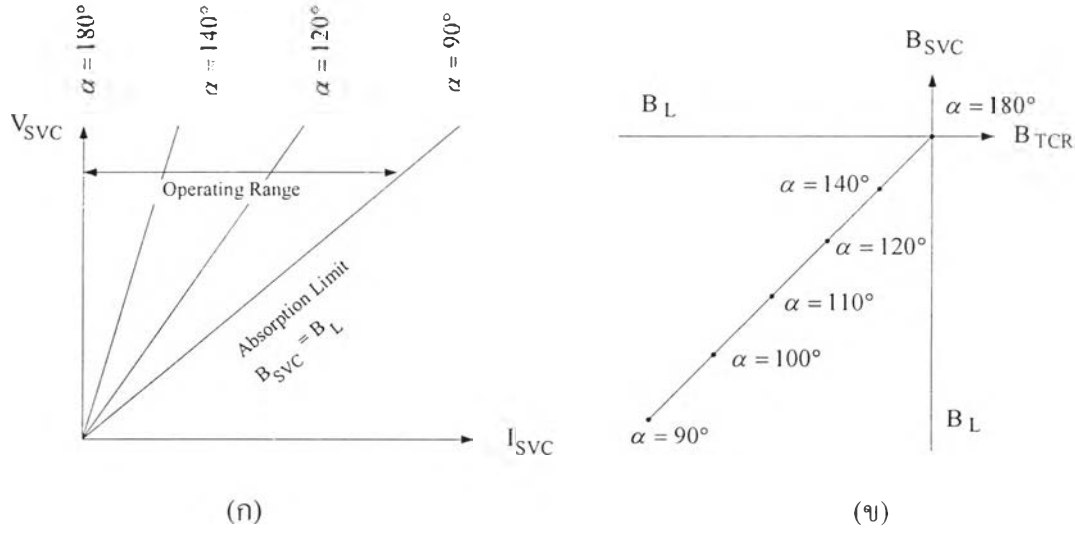
หากแทนอุปกรณ์ SVC ด้วยวงจรอย่างง่ายที่มีเฉพาะการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพียงอย่างเดียวนั้น ที่ภาวะอยู่ตัวค่าซัสเซปแตนซ์ของตัวชดเชย B_{SVC} เป็นดังสมการที่ (3.4)

$$\bar{I}_{SVC} = \bar{V} * jB_{SVC} \tag{3.4}$$

ในกรณีที่มีเพียง TCR ค่าซัสเซปแตนซ์ ของ SVC เขียนได้ดังนี้

$$B_{SVC} = B_{TCR} \tag{3.5}$$

รูปที่ 3.7 (ก) แสดงขีดจำกัดของช่วงการทำงานของ SVC ที่ภาวะอยู่ตัวโดยปราศจากการใช้ตัวควบคุมการจุดชนวนของไทริสเตอร์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซัสเซปแตนซ์สุทธิของ SVC เปรียบเทียบกับค่าซัสเซปแตนซ์ของ TCR แสดงดังรูปที่ 3.7 (ข) ซึ่งในกรณีนี้เป็นไปตามสมการ $B_{SVC} = B_{TCR}$ ค่าซัสเซปแตนซ์ ของ TCR มีค่าเป็นลบบ่งบอกถึงอุปกรณ์ที่เป็นตัวรับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจากระบบ กราฟคุณลักษณะดังกล่าวใช้เป็นประโยชน์ในการควบคุมมุมจุดชนวนของ TCR ที่จะส่งผลต่อค่า B_{SVC} ซึ่งมีอิทธิพลต่อการควบคุมสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้า

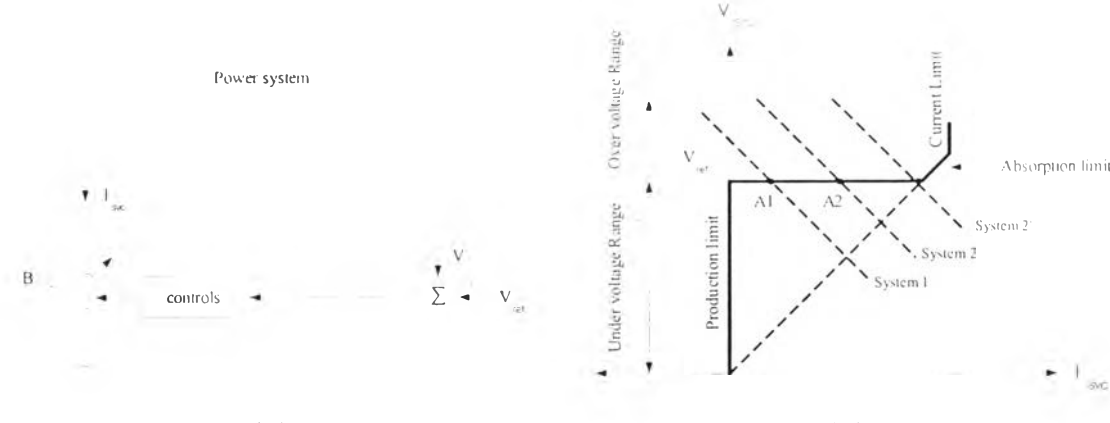


รูปที่ 3.7 กราฟคุณลักษณะการทำงานของ TCR กรณีไม่มีการควบคุมค่าแรงดัน

(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแส

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซัสเซปแตนซ์ของ SVC กับ TCR

2) <u>กรณีที่มีการควบคุมค่าแรงดัน</u> การควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อปรับเปลี่ยนค่าของ B_{TCR} เพื่อรักษาระดับแรงดันของระบบให้เท่ากับแรงดันอ้างอิง V_{ref} อยู่เสมอ สามารถอธิบายคุณลักษณะการทำงานได้ดังรูปที่ 3.8



(ก) (ข)

รูปที่ 3.8 กราฟคุณลักษณะการทำงานของ TCR กรณีมีการควบคุมค่าแรงดัน

(ก) วงจรควบคุมของ TCR

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดัน

จากรูปที่ 3.8(ข) พิจารณาตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงสมบัติของระบบส่งไฟฟ้าที่แทนด้วยคุณลักษณะของระบบที่ 1 และระบบที่ 2 ตามลำดับ ขนาดของแรงดันมีค่าลดลงแบบเชิงเส้นเมื่อมีการจ่ายกระแสให้กับโหลดประเภทตัวเหนี่ยวนำซึ่งในที่นี้จะหมายถึง TCR จุดทำงานของทั้งสองคุณลักษณะจะอยู่ที่จุด A_1 และ A_2 ได้ก็ต่อเมื่อมีการปรับค่ามุมจุดชนวนเพื่อให้มีกระแสไหลผ่าน TCR และหากระบบมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันเพิ่มสูงขึ้น ทำให้กราฟคุณลักษณะของระบบเปลี่ยนไปเป็นระบบ 2' จุดทำงานจะเคลื่อนที่จากตำแหน่ง A_2 ไปทางขวาของกราฟจนถึงค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุด หากแรงดันในระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีก ก็จะทำให้ไม่สามารถรักษาระดับแรงดันไว้ที่ค่า V_{ref} ได้อีกต่อไป ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันสมมูลภายในระบบไปเรื่อยๆ จนทำให้ไปอยู่ในช่วงแรงดันเกิน(Over voltage range) โดย TCR จะมีวงจรป้องกันกระแสเกินขีดจำกัดไว้ ในกรณีที่เกิดปัญหาแรงดันเกินขึ้น เพื่อป้องกันความเสียหาย และในทางกลับกัน หากจุดทำงานของระบบเคลื่อนที่บนเส้น V_{ref} คงที่ไปทางด้านซ้ายมือจนเลยแกนแนวดิ่งที่ค่า $I_{SVC} = 0$ แล้ว จะส่งผลให้จุดทำงานของระบบอยู่ในช่วงของแรงดันตก (Under voltage range)

3.3.2 กราฟคุณลักษณะการทำงานของ TCR-FC

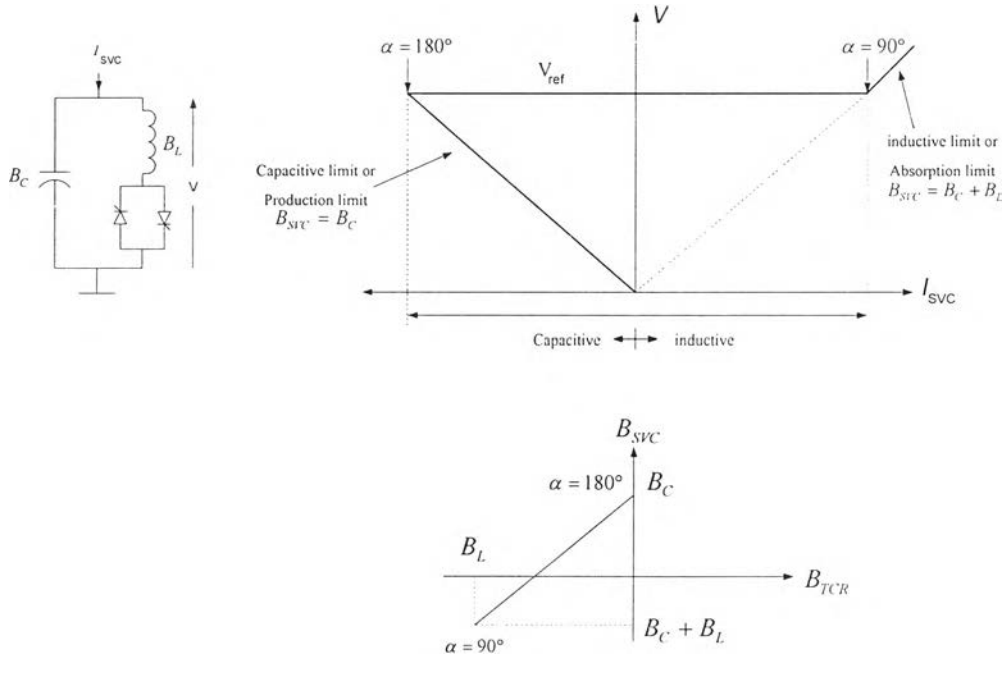
1) <u>กรณีไม่มีการต่อร่วมกับหม้อแปลงลดระดับแรงดัน</u> คุณลักษณะการทำงานระหว่างกระแสและแรงดันของตัวชดเชย TCR-FC อธิบายได้ดังรูปที่ 3.9 ตัวเก็บประจุค่าคงที่จะถูกนำไปขยายช่วงการควบคุมของ SVC ให้มีขนาดกว้างขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 3.8(ข) ที่ภาวะอยู่ตัวกระแสที่ไหลผ่าน SVC สามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังชันก์ของแรงดัน ณ ตำแหน่งติดตั้งกับค่าซัสเซปแตนซ์ของตัวชดเชย หรือ B_{SVC} ดังนี้

$$\bar{I}_{SVC} = \bar{V} * jB_{SVC} \tag{3.6}$$

โดยที่

$$B_{SVC} = B_C + B_{TCR} \tag{3.7}$$

รูปที่ 3.9 แสดงคุณสมบัติการทำงานของ SVC ที่สามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งตัวจ่ายและรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟตามความต้องการของระบบเพื่อรักษาระดับแรงดันให้มีค่าคงที่



รูปที่ 3.9 คุณลักษณะการทำงานของ TCR-FC ที่ไม่มีการต่อหม้อแปลงลดระดับแรงดัน

2) <u>กรณีมีการต่อร่วมกับหม้อแปลงลดระดับแรงดัน</u> อุปกรณ์ SVC ชนิด TCR-FC นั้นส่วนใหญ่แล้ว จะถูกต่ออยู่กับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงดันสูง ฉะนั้นจึงต้องใช้หม้อแปลงลดระดับ

แรงดันต่ออนุกรมอยู่ด้วย เพื่อให้ได้แรงดันขนาดปานกลางที่เหมาะสมกับการใช้งาน SVC ดังรูปที่ 3.10 โดยค่าซัสเซปแตนซ์ B_{SVC} ในกรณีนี้แสดงได้ตามสมการที่ (3.8)

$$B_{SVC} = \frac{B_{Tr}(B_C + B_{TCR})}{B_{Tr} + B_C + B_{TCR}} = \frac{1}{1 + \frac{B_C + B_{TCR}}{B_{Tr}}}(B_C + B_{TCR}) \tag{3.8}$$

เมื่อ B_{Tr} คือ ค่าซับเซบแตนซ์ของหม้อแปลง และ B_{TCR} ปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง B_L ตามค่ามุมจุดชนวนจาก 180^0 ถึง 90^0

จากสมการที่ (3.8) สามารถคำนวณหาค่าขีดจำกัดของค่าซับเซบแตนซ์ที่ขีดจำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูงสุด (Production limit) หรือขีดจำกัดตัวเก็บประจุ นั่นคือ เมื่อ $B_{TCR} = 0$ ที่ $\alpha = 180^0$ ดังสมการที่ (3.9)

$$B_{SVC,max} = \frac{B_{Tr}B_C}{B_{Tr} + B_C} \tag{3.9}$$

ในทางกลับกัน ค่าซับเซบแตนซ์ที่ขีดจำกัดการรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูงสุด (Absorbtion limit) หรือ ขีดจำกัดตัวเหนี่ยวนำ นั่นคือ เมื่อ $B_{TCR} = B_L$ ที่ $\alpha = 90^0$ คำนวณได้ดังนี้

$$B_{SVC,min} = \frac{B_{Tr}(B_C + B_L)}{B_{Tr} + B_C + B_L} \tag{3.10}$$

จากสมการที่ (3.8) จะเห็นว่า B_{SVC} ไม่ได้เปลี่ยนแปลงแบบเป็นเชิงเส้นกับค่าของ B_{TCR} อย่างไรก็ตาม กรณีปกติที่อัตราส่วนของ $(B_C/B_{Tr}) << 1$ และ $(B_L/B_{Tr}) << 1$ จะทำให้ผลจากการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีผลกระทบน้อยมากๆ เพราะฉะนั้นจึงถูกนำมาเป็นข้อกำหนดว่าค่ารีแอคแตนซ์ของหม้อแปลงที่ต่ออยู่นี้ต้องมีค่าน้อยกว่าค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุค่าคงที่และตัว TCR ดังนั้นจึงนำสมการที่ (3.8) มาประมาณให้เป็นแบบเชิงเส้นคือ

$$B_{SVC} = (1 - \frac{B_C}{B_{Tr}})B_C + (1 - \frac{2B_C + B_L}{B_{Tr}})B_{TCR} \tag{3.11}$$

ซึ่งจะประมาณค่าขีดจำกัดของซัสเซปแตนซ์จากการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นได้ดังสมการที่(3.12) และสมการที่(3.13)

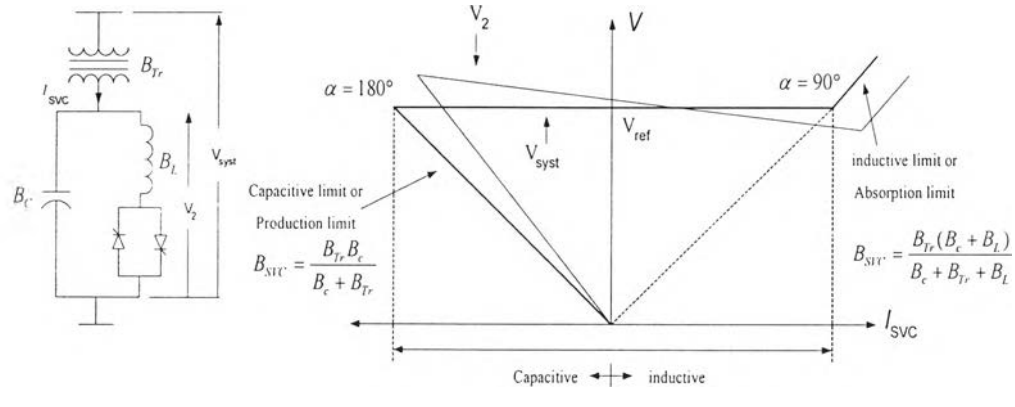
$$B_{SVC,\max} = (1 - \frac{B_C}{B_{Tr}})B_C \tag{3.12}$$

$$B_{SVC,\min} = (1 - \frac{B_C + B_L}{B_{Tr}})(B_C + B_L) \tag{3.13}$$

โดยแรงดันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง คือ

$$\overline{V}_2 = \bar{I}_{SVC} \frac{1}{j(B_C + B_{TCR})} \tag{3.14}$$

รูปที่ 3.10 แสดงถึงคุณลักษณะการทำงานของ SVC ที่มีการพิจารณาหม้อแปลงลดระดับแรงดันด้วย จะเห็นว่าความสัมพันธ์ของค่ากระแส และแรงดันทางด้านทุติยภูมิ V_2 ของหม้อแปลงในช่วงของการควบคุมนั้น จะเป็นเส้นกราฟที่มีค่าความชันติดลบตามสมการที่(3.14) เนื่องจากต้องการรักษาระดับแรงดัน V_{syst} ของระบบช่วงที่ควบคุมได้ให้คงที่



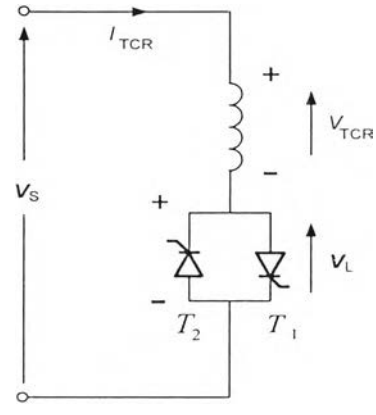
รูปที่ 3.10 คุณลักษณะการทำงานของ TCR-FC ที่มีการต่อหม้อแปลงลดระดับแรงดัน

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ SVC

การศึกษาการทำงานของ SVC โดยการสร้างแบบจำลอง แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะหลัก กล่าวคือ แบบจำลองที่ภาวะอยู่ตัว และแบบจำลองเชิงพลวัต

3.4.1 แบบจำลองที่ภาวะอยู่ตัว (Steady-State Model)

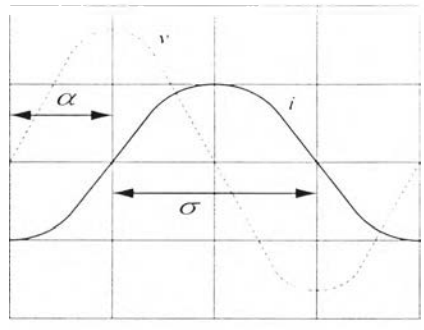
ในที่นี้จะแสดงเฉพาะแบบจำลองของอุปกรณ์ TCR แบบเฟสเดียว ซึ่งมีองค์ประกอบพื้นฐานประกอบไปด้วยไทริสเตอร์สองตัวต่อขนานกันแบบกลับทิศ (Anti-parallel-connected pair of thyristor valves) ซึ่งได้แก่ T1 และ T2 ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 3.11



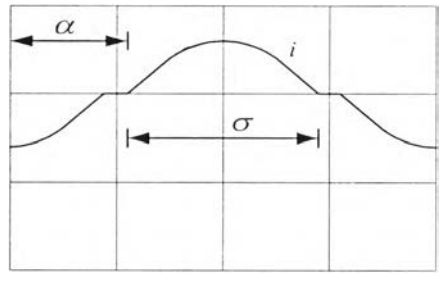
รูปที่ 3.11 โครงสร้างพื้นฐานของ TCR แบบเฟสเดียว

พฤติกรรมของไทริสเตอร์สองตัวต่อขนานกันแบบกลับทิศทางนี้จะทำหน้าที่เปรียบเสมือนสวิตช์สองทิศทาง(Bidirectional switch) จากรูปที่ 3.11 ไทริสเตอร์ T1 นำกระแสในช่วงสัญญาณครึ่งบวก และ T2 นำกระแสในช่วงสัญญาณครึ่งลบของการเปลี่ยนแปลงแรงดันในหนึ่งคาบ ส่วนค่าของมุมจุดชนวนนั้นอ้างอิงจากจุดที่แรงดันมีค่าเป็นศูนย์และกำลังเริ่มเป็นบวก โดยแรงดันอ้างอิงนี้จะวัดจากแรงดันตกคร่อมขั้วของอุปกรณ์ TCR คือ V_S ในรูป

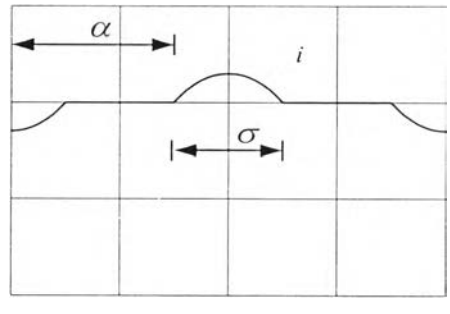
ขอบเขตของการควบคุมมุมจุดชนวน(α) อยู่ระหว่าง 90 องศาไปจนถึง 180 องศา โดยที่มุมจุดชนวนเท่ากับ 90 องศา ไทริสเตอร์จะมีการนำกระแสเต็มเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 3.12(ก) หากมุมจุดชนวนมีค่ามากกว่า 90 องศา เป็นต้นไปจนถึง 180 องศา กระแสจะไหลแบบไม่ต่อเนื่อง โดยมีความสมมาตรทั้งซีกบวกและซีกลบตามรูปที่ 3.12(ข) และ 3.12(ค) หากมุมจุดชนวนมีค่าเท่ากับ 180 องศา ไทริสเตอร์จะไม่มีการนำกระแส และเมื่อไทริสเตอร์นำกระแสไปจนถึงจุดที่แรงดันตกลงเป็นศูนย์แล้ว ไทริสเตอร์จะหยุดนำกระแสเองและรอการจุดชนวนในรอบต่อไป การทำงานในลักษณะนี้เรียกว่า “Line commutation”



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.12 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของ TCR ที่มุมจุดชนวนต่างกัน

(ก) $\alpha = 90^\circ$, $\sigma = 180^\circ$

(ข) $\alpha = 100^\circ$, $\sigma = 160^\circ$

(ค) $\alpha = 130^\circ$, $\sigma = 100^\circ$

จากรูปที่ 3.11 สามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างมุมจุดชนวน α กับกระแสที่ไหลผ่าน TCR โดยให้แหล่งจ่ายแรงดันเป็น $v_s(t) = V_m \sin \omega t$ เมื่อ V_m คือ ค่ายอดของแรงดัน และ ω คือ ความถี่เชิงมุมของแหล่งจ่ายแรงดัน จะได้ว่ากระแสที่ไหลผ่าน TCR ในช่วงที่ไทริสเตอร์นำกระแส เขียนเป็นสมการอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$L\frac{di_{TCR}}{dt} - v_s(t) = 0 \tag{3.15}$$

เมื่อ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของ TCR

จากสมการที่ (3.15) จัดรูปได้เป็น

$$i_{TCR}(t) = \frac{1}{L}\int_{\alpha}^{\omega t} v_s(\omega t)\, d\omega t \tag{3.16}$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$i_{TCR}(t) = \begin{cases} \dfrac{V_m}{\omega L}(\cos\alpha - \cos\omega t) & \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0 & \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \tag{3.17}$$

เมื่อกำหนดให้ σ คือ มุมนำกระแส (Conduction angle) ของ TCR ซึ่งมีค่าตามสมการที่(3.18)

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \tag{3.18}$$

จากการวิเคราะห์โดยใช้อนุกรมฟูเรียร์เพื่อหาค่ากระแสที่ความถี่มูลฐานของ TCR (Fundamental current: ITCR) โดยแทนด้วยสัญลักษณ์ $I_1(\alpha)$ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเรากำหนดให้อยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$I_1(\alpha) = a_1\cos\omega t + b_1\sin\omega t \tag{3.19}$$

ในกรณีนี้ $b_1 = 0$ เนื่องจากฟังก์ชันกระแสที่ไหลเป็นฟังก์ชันคู่ และจากคุณสมบัติ $f(x+T/2) = -f(x)$ สัมประสิทธิ์ a_1 จะคำนวณได้จากสูตร

$$a_1 = \frac{4}{T}\int_0^{T/2} f(x)\cos(\frac{2\pi x}{T})dx \qquad (3.20)$$

แทนค่า f(x) ด้วยสมการที่(3.17) ลงในสมการที่(3.20) และแทนค่า a1 ในสมการที่(3.19)จะได้ว่า

$$I_1(\alpha) = \frac{V_m}{\omega L}(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi}\sin 2\alpha) \qquad (3.21)$$

จากสมการที่(3.21) เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (3.22)

$$I_1(\alpha) = V_m B_{TCR}(\alpha) \qquad (3.22)$$

โดยที่

$$B_{TCR}(\alpha) = B_{\max}(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi}\sin 2\alpha) \qquad (3.23)$$

และ $$B_{\max} = \frac{1}{\omega L} \qquad (3.24)$$

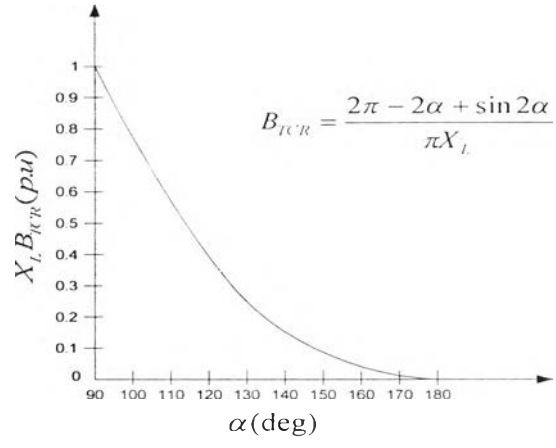
จากสมการที่(3.17) สามารถแสดงความสัมพันธ์ของกระแสที่ความถี่มูลฐานและค่าซัสเซปแตนซ์ของ TCR เป็นฟังชันก์ของมุมนำกระแส σ ได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$I_1 = V_m B_{\max}\left(\frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi}\right) \qquad (3.25)$$

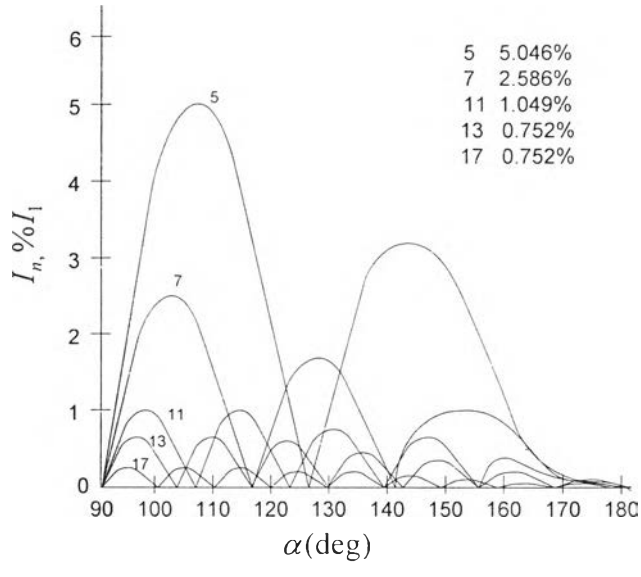
$$B_{TCR}(\sigma) = B_{\max}\left(\frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi}\right) \qquad (3.26)$$

รูปที่ 3.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าต่อหน่วย(Per unit) ของค่า B_{TCR} เมื่อค่าของมุมจุดชนวนเปลี่ยนไป โดยใช้ค่าฐานมีค่าเท่ากับ B_{max}

I22221912



รูปที่ 3.13 กราฟคุณสมบัติการควบคุมค่าซัสเซปแตนซ์ของ TCR



รูปที่ 3.14 องค์ประกอบของกระแสฮาร์โมนิคของ TCR ที่มุมจุดชนวนต่างกัน

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าอุปกรณ์ TCR มีพฤติกรรมเปรียบเสมือนค่าซัสเซปแตนซ์แบบปรับค่าได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่ามุมจุดชนวน นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ดูดซับโดยตัวเหนี่ยวนำเมื่อต่อร่วมกับระบบ ที่แรงดันค่าคงที่หนึ่ง ๆ

หากพิจารณากระแสฮาร์มอนิคที่เกิดขึ้นกรณีที่ไทริสเตอร์นำกระแสที่มุมมากกว่า 90° หากไทริสเตอร์ทั้งสองตัวที่ทำงานในครึ่งบวกและครึ่งลบถูกจุดชนวนให้ทำงานอย่างสมมาตรกัน ก็จะมีแต่ฮาร์โมนิคเลขคี่เกิดขึ้นโดยค่าของกระแสที่ความถี่ฮาร์มอนิคต่าง ๆ วิเคราะห์ได้จากการกระจายฟูเรียร์ ดังสมการที่ (3.27) และการเปลี่ยนแปลงของกระแสฮาร์มอนิคที่ความถี่ต่างๆ แสดง

ไว้ในรูปที่ 3.14 ซึ่งจะเห็นว่าไม่มีฮาร์โมนิคเลขคู่ปรากฏ เนื่องจากความสมมาตรของรูปคลื่นกระแสทั้งซีกบวกและซีกลบ

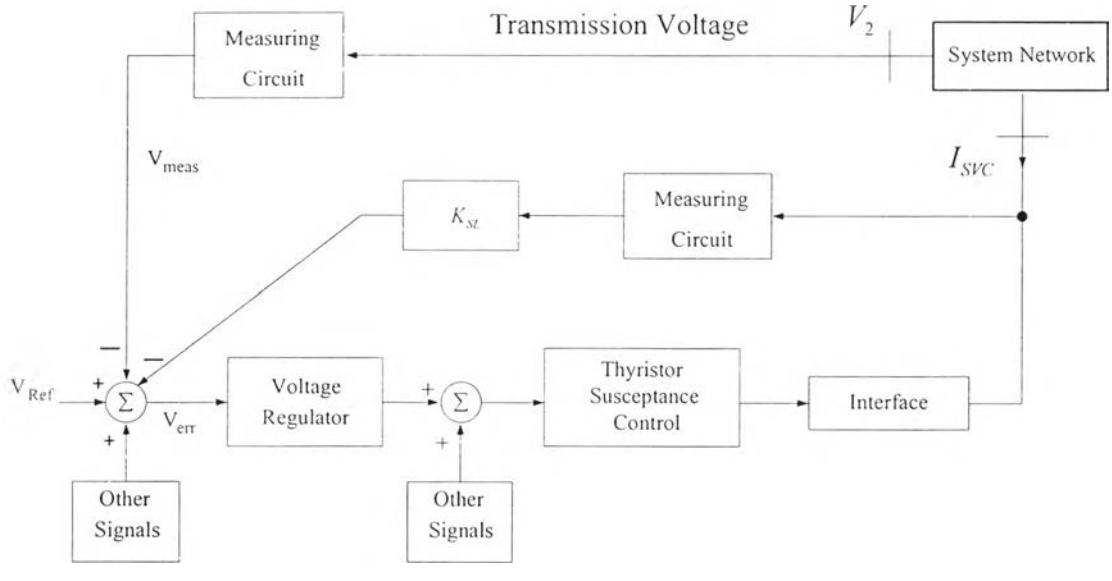
$$I_n = \frac{V_m}{\omega L}\frac{4}{\pi}\left[\frac{\sin\alpha\cos(n\alpha) - n\cos\alpha\sin(n\alpha)}{n(n^2-1)}\right] \tag{3.27}$$

เมื่อ n=2k+1 และ k = 1, 2, 3. . .

3.4.2 แบบจำลองเชิงพลวัต (Dynamic Model)

1) หลักการพื้นฐาน

โดยทั่วไปแบบจำลองเชิงพลวัตของ SVC ที่ใช้สำหรับควบคุมขนาดของแรงดันที่บัสที่ติดตั้ง SVC แสดงได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แผนภาพการควบคุมเชิงพลวัตเพื่อรักษาขนาดแรงดันด้วย SVC [15]

จากรูปที่ 3.15 จะทำการวัดแรงดัน V_2 ผ่านชุดอุปกรณ์ลดทอนขนาดของแรงดันเพื่อส่งไปยังชุดควบคุม โดยนำสัญญาณของ V_m ไปเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง V_{ref} และสัญญาณควบคุมเพิ่มเติมอื่น ค่าความแตกต่างของขนาดแรงดันแสดงด้วย V_{err} จากนั้นจะนำค่าความแตกต่างนี้ไปใช้ควบคุมมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์เพื่อปรับเปลี่ยนค่าของซัสเซปแตนซ์สุทธิของ SVC ทำ

ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน V_2 ใหม่ที่อยู่ในช่วงที่ต้องการ กล่าวคือ $V_{ref} \pm \Delta V$ การเปลี่ยนแปลงเชิงพลวัตของค่าซัสเซปแตนซ์สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (3.28) และ (3.29) [10]

$$\dot{B}_L(t) = \frac{1}{T_B}[-B_L(t) + B_{L0} + k_B V_{err}(t)] \tag{3.28}$$

$$B_{SVC}(t) = B_L(t) + B_C \tag{3.29}$$

โดยที่ T_B คือ ค่าคงที่ทางเวลาของชุดควบคุมแรงดันของ SVC

B_{L0} คือ ค่าซับเซบแตนซ์เริ่มต้นของ TCR

V_{err} คือ สัญญาณความผิดพลาดขาเข้าของชุดควบคุมแรงดัน

k_B คือ อัตราขยายของชุดควบคุมแรงดัน

จากนี้ไป จะกล่าวถึงรายละเอียดของการควบคุมแรงดันโดยใช้ SVC แบบจำลองเชิงพลวัตของตัวควบคุม และการออกแบบตัวควบคุมเพื่อนำไปใช้งานในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

2) การควบคุมระดับแรงดันโดย SVC

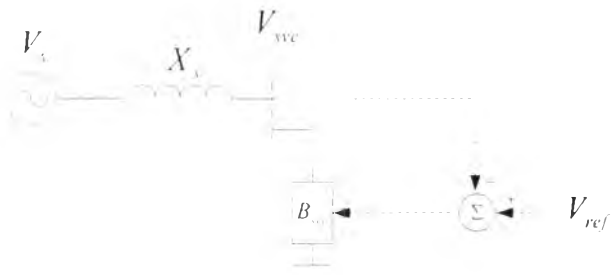
การควบคุมระดับแรงดันของ SVC สามารถอธิบายพฤติกรรมด้วยบล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายดังรูปที่ 3.16 โดยแทนระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยค่าอิมพีแดนซ์สมมูล X_S อนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันสมมูลของระบบ หรือ V_s ซึ่งอิมพีแดนซ์สมมูลของระบบสามารถหาได้จากสมการที่ (3.30)

$$X_s = \frac{V_b^2}{S_c} \cdot MVA_b \tag{3.30}$$

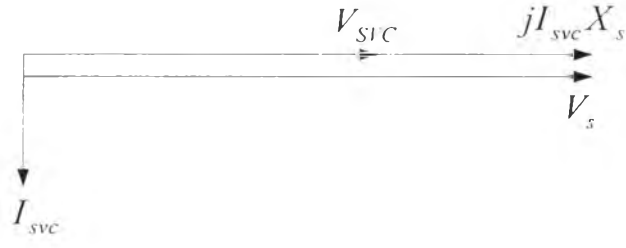
เมื่อ S_c คือ ค่าขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล ณ ตำแหน่งติดตั้ง SVC

V_b คือ ค่าพิกัดต่อหน่วยของแรงดันระหว่างสาย (Line-to-line voltage) และ

MVA_b คือ ค่าฐานกำลังไฟฟ้าของระบบ



รูปที่ 3.16 แผนภาพอย่างง่ายของ SVC เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้า

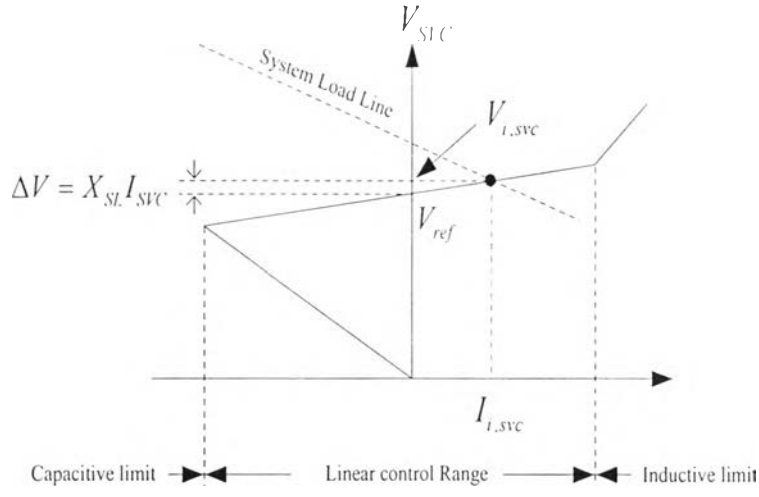


รูปที่ 3.17 เฟสเซอร์ของระบบส่งไฟฟ้าเมื่อ SVC นำกระแสในลักษณะตัวเหนี่ยวนำ

ขณะที่ SVC นำกระแส หากไม่มีการควบคุมขนาดแรงดันให้คงที่ ขนาดของแรงดันที่บัสที่ SVC ติดตั้งอยู่จะมีค่า ดังสมการที่(3.31)

$$V_{SVC} = V_S - I_{SVC} X_S = V_S - \Delta V \tag{3.31}$$

จะเห็นว่า สมการที่ (3.31) แสดงเส้นกราฟโหลดของระบบ(System load line) หรือคุณลักษณะของระบบ (Power system characteristic) จากเฟสเซอร์ที่แสดงในรูปที่ 3.17 พบว่าแรงดันที่บัสของ SVC จะมีค่าลดลงเมื่อ SVC นำกระแสในช่วงอินดัคทีฟ(Inductive current) และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อนำกระแสในช่วงคาปาซิทีฟ (Capacitive current) การควบคุมระดับแรงดันของ SVC จะยิ่งมีผลสำคัญเมื่อนำไปใช้กับระบบที่มีความแข็งแกร่งของการเชื่อมโยงระบบต่ำ (Weak AC systems) หรือ มีค่าอิมพิแดนซ์สมมูล X_S สูง นั่นเอง



รูปที่ 3.18 กราฟคุณลักษณะของระบบและ SVC

รูปที่ 3.18 แสดงกราฟคุณลักษณะของ SVC ที่มีการควบคุมเชิงพลวัต ซึ่งจุดทำงานของระบบ(Quiescent point) กำหนดจากจุดตัดระหว่างเส้นกราฟโหลดของระบบกับกราฟคุณลักษณะของ SVC ในช่วงการควบคุมแบบเชิงเส้น กำหนดให้ I_{SVC} มีค่าเป็นบวกสำหรับกระแสในช่วงอินดัคทีฟและเป็นลบสำหรับกระแสคาปาซิทีฟ และ X_{SL} คือ ความชันของกราฟคุณลักษณะระหว่างกระแสและแรงดันของ SVC (*V-I* droop characteristic) ในช่วงการควบคุมแบบเชิงเส้น ดังนั้น คุณลักษณะการควบคุมขนาดแรงดันในช่วงการควบคุมแบบเชิงเส้นแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$V_{SVC} = V_{ref} + I_{SVC} X_{LS} \tag{3.32}$$

3) อิทธิพลของ SVC ต่อระบบส่งกำลังไฟฟ้า

พฤติกรรมการควบคุมค่าซัสเซปแตนซ์เพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ขึ้นอยู่กับความแข็งแกร่งของระบบที่ SVC นั้นๆ ต่ออยู่ และพิกัดกระแสรีแอคทีฟของ SVC ซึ่งจะเห็นได้จากคำอธิบายข้างล่างนี้

(ก) <u>กรณีละเลยผลของการต่อหม้อแปลง</u>

หากวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่บัส SVC เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสของ SVC ในช่วงแคบๆ จากสมการที่ (3.31) เมื่อพิจารณาให้ V_S เป็นแหล่งจ่ายแรงดันค่าคงที่ จะได้ว่า

$$\Delta V_{SVC} = -X_S \Delta I_{SVC} \tag{3.33}$$

นอกจากนั้น ค่าแรงดัน V_{SVC} กับค่ากระแส I_{SVC} สัมพันธ์กับ B_{SVC} ตามสมการที่(3.34)

$$I_{SVC} = B_{SVC} V_{SVC} \tag{3.34}$$

และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆ ของกระแส I_{SVC} โดยวิธีวิเคราะห์แบบเชิงเส้น จะได้

$$\Delta I_{SVC} = B_{SVC0} \Delta V_{SVC} + \Delta B_{SVC} V_{SVC0} \tag{3.35}$$

เมื่อ B_{SVC0} และ V_{SVC0} คือ ค่าซัสเซปแตนซ์ และ ค่าแรงดันที่บัส SVC เริ่มต้น ตามลำดับ

แทนค่า ΔI_{SVC} จากสมการที่(3.35) ลงในสมการที่ (3.33) จะได้ว่า

$$\frac{\Delta V_{SVC}}{\Delta B_{SVC}} = \frac{-V_{SVC0}}{ESCR + B_{SVC0}} \tag{3.36}$$

โดยที่ ESCR (Effective short-circuit ratio) มีค่าเท่ากับ

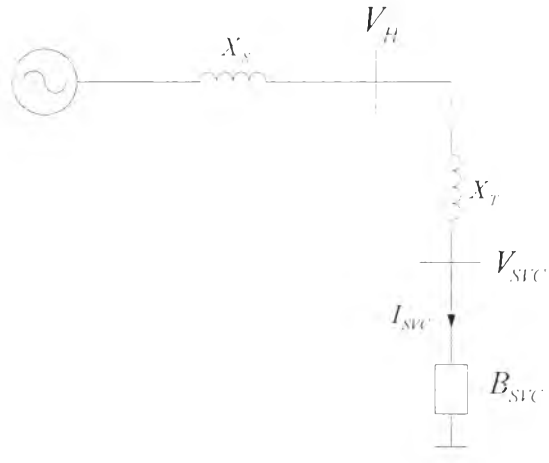
$$ESCR = \frac{1}{X_S} \tag{3.37}$$

จะเห็นว่า จากสมการที่ (3.36) ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ SVC บัส จะแปรผันตรงกับค่า ΔB_{SVC} หรือ $\Delta V_{SVC} \ \alpha \ \Delta B_{SVC}$

(ข) <u>กรณีคิดผลของหม้อแปลง</u>

หากพิจารณาผลของหม้อแปลงลดระดับแรงดัน ดังแสดงด้วยวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.19 จะได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่บัสแรงดันสูงกับบัสแรงดันต่ำเป็นไปตามสมการที่ (3.38)

$$\frac{V_{SVC}}{V_H} = \frac{1}{1 + X_T B_{SVC}} \tag{3.38}$$



รูปที่ 3.19 วงจรสมมูลของ SVC เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าผ่านหม้อแปลง

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (3.38) จะได้ว่า

$$\Delta V_{SVC}(1 + X_T B_{SVC0}) + V_{SVC0} X_T \Delta B_{SVC} = \Delta V_H \tag{3.39}$$

ใช้สมการที่ (3.38) และ (3.39) แสดงความสัมพันธ์ในลักษณะเช่นเดียวกับสมการที่ (3.36) จะได้ว่า

$$\frac{\Delta V_H}{\Delta B_{SVC}} = \frac{-V_{H0}}{(ESCR + B_{SVC0})}\left(\frac{1 - X_T ESCR}{1 + X_T B_{SVC0}}\right) \tag{3.40}$$

จากสมการที่ (3.40) จะเห็นว่ากรณีที่มีหม้อแปลงติดตั้งอยู่ด้วยจะยังคงทำให้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัสของ SVC แปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงค่าซัสเซปแตนซ์ของ SVC เหมือนเดิม แต่มีอัตราขยายเปลี่ยนไป

(ค) <u>อัตราขยายของระบบ</u>

จากการรวมสมการที่ (3.34) และ (3.31) เข้าด้วยกัน จะพบว่า

$$V_{SVC} = \frac{V_s}{(1 + B_{SVC} / ESCR)} \tag{3.41}$$

สำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ โดยทั่วไปแล้ว ESCR >> B_{SVC} หรือ X_S << $1/B_{SVC}$ ดังนั้นสมการที่ (3.41) สามารถประมาณได้ ดังนี้

$$V_{SVC} \cong V_S(1 - \frac{B_{SVC}}{ESCR}) \tag{3.42}$$

และจากสมการที่ (3.31)

$$\Delta V = V_S - V_{SVC} \tag{3.43}$$

แทนค่า V_{SVC} จากสมการที่ (3.42) ลงในสมการที่ (3.43) จะได้ว่า

$$\Delta V = \frac{V_S B_{SVC}}{ESCR} \tag{3.44}$$

หรือ

$$\Delta V = K_N B_{SVC} \tag{3.45}$$

เมื่อ K_N คือ อัตราขยายของระบบ มีค่าเท่ากับ

$$K_N = \frac{V_S}{ESCR} = \frac{V_S}{B_S} \tag{3.46}$$

จากสมการที่ (3.45) จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันที่ SVC บัสจะแปรผันตามค่า B_{SVC} โดยที่ K_N เป็นเพียงค่าคงที่ค่าหนึ่งเท่านั้น อย่างไรก็ตามค่าอัตราขยาย K_N จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อโครงสร้างของระบบมีการเปลี่ยนแปลง โดยในระบบที่มีความแข็งแกร่งจะมีค่าอัตราขยายต่ำ ส่วนระบบที่มีความอ่อนแอจะมีค่าอัตราขยายสูงตามลำดับ

การออกแบบชุดควบคุมของ SVC จะอ้างอิงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นค่าต่อหน่วย (Per unit) โดยกำหนดให้ V_b และ $B_b = B_{max} - B_{min}$ เป็นค่าฐานของแรงดัน และค่าฐานของซัสเซปแตนซ์ ตามลำดับ ดังนั้นค่าต่อหน่วยของอัตราขยาย K_N ก็คือ

$$K_N = \frac{V_S}{V_b} \cdot \frac{B_b}{B_S} \tag{3.47}$$

เมื่อ V_b คือ ค่าแรงดันพิกัดของระบบ

B_{max} คือ ค่าซับเซบแตนซ์สูงสุดของ SVC (Fully capacitive)

B_{min} คือ ค่าซับเซบแตนซ์ต่ำสุดของ SVC (Fully inductive)

จัดรูปสมการที่ (3.47) ใหม่ได้ดังนี้

$$K_N = \frac{V_S}{V_b} \cdot \frac{Q_{SVC}}{B_S V_S V_b \frac{V_b}{V_c}} \tag{3.48}$$

หรือ

$$K_N = \frac{V_S Q_{SVC}}{V_b S_C \frac{V_b}{V_c}} \tag{3.49}$$

เมื่อ $Q_{SVC} = Q_{production} - Q_{absorption}$

$Q_{production}$ คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟมากที่สุดที่ SVC สามารถจ่ายให้กับระบบ

$Q_{absorption}$ คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟมากที่สุดที่ SVC สามารถรับจากระบบ

$S_C = V_b(B_s * V_s)$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรของระบบที่บัสของ SVC

นอกจากนี้ ถ้าเราสมมติให้ V_S/V_b มีค่าใกล้เคียงกับ 1 ก็จะได้ว่า

$$K_N = \frac{\Delta V_{SVC}}{B_{SVC}} = \frac{Q_{SVC}}{S_C} \, pu \tag{3.50}$$

และ

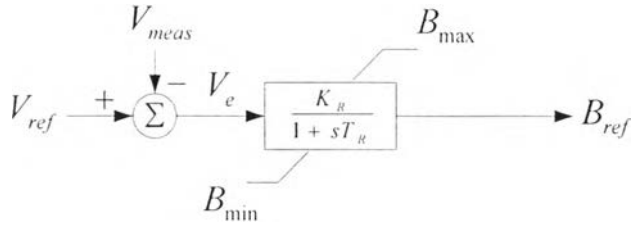
$$K_{N,max} = \frac{Q_{SVC}}{S_{C,min}} \tag{3.51}$$

$$K_{N,min} = \frac{Q_{SVC}}{S_{C,max}} \tag{3.52}$$

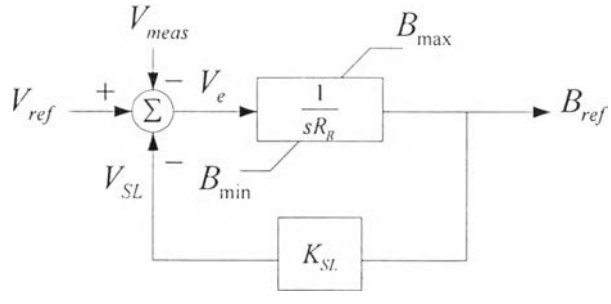
4) แบบจำลองตัวควบคุมเพื่อรักษาระดับแรงดันของ SVC

ในหัวข้อนี้ จะแสดงแบบจำลองของตัวควบคุมเพื่อรักษาระดับแรงดัน 3 แบบ โดยสองแบบแรกแทนด้วยตัวควบคุมแบบอัตราขยาย และค่าคงที่เชิงเวลา(Gain-time constant) กับตัวควบคุมแบบปริพันธ์กับการป้อนกลับด้วยค่าซัสเซปแตนซ์(Integrator with susceptance-droop

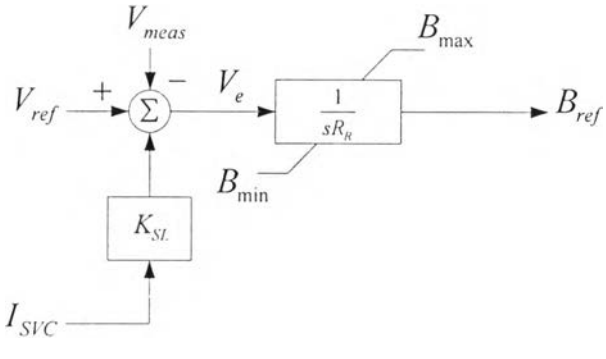
feedback) และตัวควบคุมแบบปริพันธ์กับการป้อนกลับด้วยค่ากระแส(Integrator with current-droop feedback) ดังแสดงไว้ ในรูป 6.27(ก) -(ค) ตามลำดับ และแบบที่สามคือ ตัวควบคุมแบบ PI



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.20 แบบจำลองเชิงพลวัตของตัวควบคุมแรงดัน

(ก) ตัวควบคุมอัตราขยาย และค่าคงที่เชิงเวลา

(ข) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์กับการป้อนกลับด้วยค่าซัสเซปแตนซ์

(ค) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์กับการป้อนกลับด้วยค่ากระแส

จากรูปที่ 3.20 ความหมายของตัวแปรต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้ K_R คือ อัตราขยายสถิต ซึ่งอัตราขยายสถิตที่ว่านี้จะมีค่าเท่ากับ $1/K_{SL}$ T_R คือ ค่าเวลาคงที่ของชุดควบคุมแรงดันมีหน่วยเป็นวินาที K_{SL} หรือ X_{SL} คือ ความค่าความชันของกระแสของ SVC มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ และ R_R คือ ค่าอัตราตอบสนอง (ms/pu) และจากในรูปที่ 3.20(ก) ค่าเวลาคงที่ของตัวควบคุมรักษาระดับแรงดัน(the regulator time constant,T_R) จะมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราตอบสนอง R_R ที่อยู่ในรูปที่ 3.20(ข)-(ค) คือ

$$T_R = \frac{R_R}{K_{SL}} \tag{3.51}$$

และ
$$K_{SL} = X_{SL} = \frac{\Delta V}{\Delta I}\Omega \tag{3.52}$$

เมื่อ
$$\Delta V = V_{SVC\max} - V_{SVC\min}, \Delta I = I_C - I_L \tag{3.53}$$

จากสมการที่(3.53) ค่า I_C คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุค่าคงที่

ค่า I_L คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออยู่กับอุปกรณ์ไทริสเตอร์

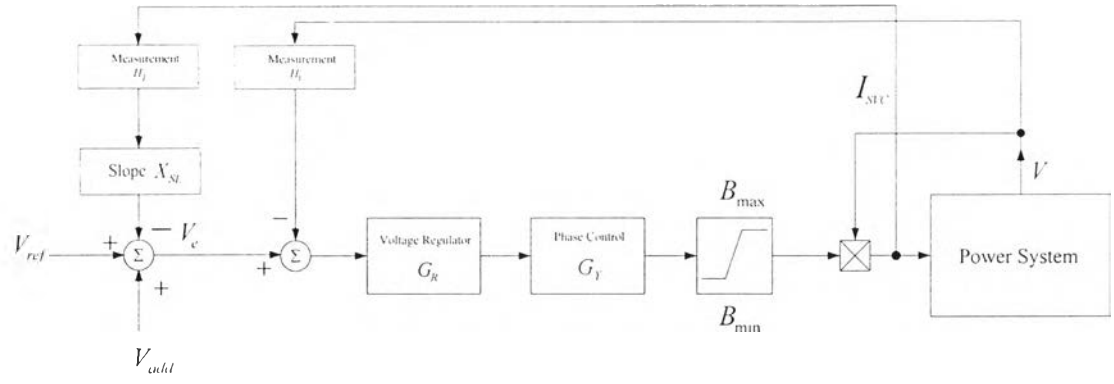
ส่วนแบบจำลองของตัวควบคุมชนิด PI (Proportional-integral controller) ในการออกแบบจะพิจารณาอัตราขยายของระบบ โดยในที่นี้จะละเลยผลของความต้านทานในระบบส่งไฟฟ้า มีเพียงแต่ค่ารีแอคแตนซ์เท่านั้น และมีสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

- การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันในระบบเนื่องจากผลของ SVC มีค่าน้อย
- ขนาดแรงดันของบัส SVC มีค่าใกล้เคียงค่าพิกัดแรงดันปกติ กล่าวคือ $V_{SVC} \cong 1pu$
- ค่าแรงดันอ้างอิงของ SVC แทนได้ด้วยค่าคงที่

ดังนั้น ค่ากระแส I_L ที่ไหลผ่าน TCR และ I_C ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุค่าคงที่ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_L = B_L V_{SVC} \approx B_L \text{ in pu} \tag{3.54}$$

$$I_C = B_C V_{SVC} \approx B_C \text{ in pu} \tag{3.55}$$



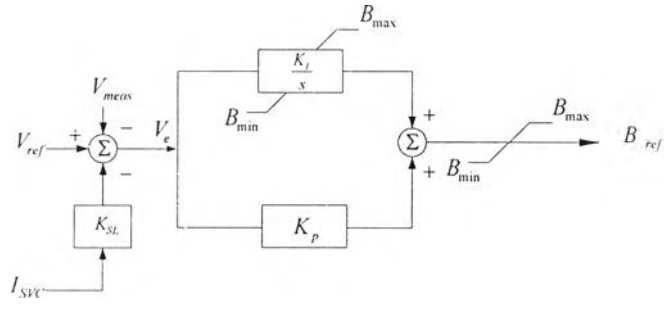
รูปที่ 3.21 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันในระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้ SVC

จากรูปที่ 3.21 ฟังชันก์ถ่ายโอนของชุดควบคุมมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์ หรือ G_Y ถูกแทนได้ด้วยสมการที่(3.56)

$$G_Y(s) = \frac{e^{-sT_d}}{1+sT_Y} \tag{3.56}$$

โดยที่ T_d คือ ช่วงเวลาที่ไทริสเตอร์ไม่มีการตอบสนองต่อสัญญาณจุดชนวนโดยทั่วไปแล้วมีค่าเท่ากับรอบเวลาหารด้วยสิบสอง(cycle time/12)

T_Y คือ เวลาหน่วงในการจุดชนวนของไทริสเตอร์จากลำดับการสวิตช์ชิ่ง และมีค่าโดยประมาณเท่ากับรอบเวลาหารด้วยสี่ (cycle time/4)



รูปที่ 3.22 แบบจำลองตัวควบคุมแรงดันของ SVC แบบ PI

ตัวควบคุมแบบ PI ดังรูปที่ 3.22 มีฟังชันก์ถ่ายโอน คือ

$$G_R(s) = \frac{K_I}{s} + K_P \tag{6.65}$$

จากการศึกษาใน [15] พบว่าตัวควบคุมแบบ PI จะควบคุมให้ SVC ทำงานในการตอบสนองต่อการควบคุมแรงดันของระบบด้วยความเร็วมากที่สุดสำหรับระบบที่อ่อนแอ หรือระบบที่มีค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่มีค่าต่ำ ซึ่งระบบลักษณะนี้จะมีอัตราขยายของระบบแทนด้วยค่า $K_{N\,max}$ จากสมการที่(3.51) ดังนั้นฟังชั่นก์ถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ PI จะสามารถคำนวณใหม่ได้จาก[29]

$$G_R(s) = K_P(1 + \frac{1}{sT_Y}) = -\frac{1}{2(K_{SL} + K_{N,MAX})}(1 + \frac{1}{sT_Y}) \tag{6.66}$$

จากรูปที่ 3.21 ฟังชั่นก์ถ่ายโอนของระบบแบบลูปปิดโดยรวมทั้งหมดที่มีอินพุทและเอาท์พุทเป็นดังสมการที่(6.67)

$$\begin{aligned} G_w(s) &= \frac{\Delta V(s)}{\Delta V_{ref}(s)} \\ &= \frac{K_N G_R G_Y}{1 + (K_{SL} + K_N) G_R G_Y H_M} \end{aligned} \tag{6.67}$$

เมื่อ H_M คือ ฟังชันก์ถ่ายโอนของเครื่องมือวัดที่ใช้วัดแรงดันในระบบ

และเมื่อทำการพิจารณาเพียงค่าเวลาตอบสนองของตัวควบคุมเพียงอย่างเดียวเนื่องจากเป็นค่าเวลาที่มีค่ามากที่สุด จะได้ว่า

$$G_w(s) = \frac{K_N}{(K_{SL} + K_N)} \cdot \frac{sT_w}{1 + sT_w} \tag{6.68}$$

โดยที่

$$T_w = 2(\frac{K_{SL} + K_{N\max}}{K_{SL} + K_N})T_Y \tag{6.69}$$

ดังนั้น ผลตอบเชิงเวลาของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่ SVC บัสต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอ้างอิง ΔV_{ref} คือ

$$\Delta V = \frac{K_N}{K_{SL} + K_N} \Delta V_{ref} (1 - e^{-t/Tw}) \tag{6.70}$$

จากสูตรการคำนวณที่ทำการวิเคราะห์มาก่อนหน้านี้จึงทำให้สรุปได้ว่า

1. การเปลี่ยนของ ΔV_{ref} ทำให้แรงดันที่บัสของ SVC มีการเปลี่ยนแปลงโดยค่า $k \cdot V_{ref}$ เพราะเนื่องมาจากความชันของกระแส(Current droop) เมื่อ $k = K_N /(K_{SL} + K_N)$

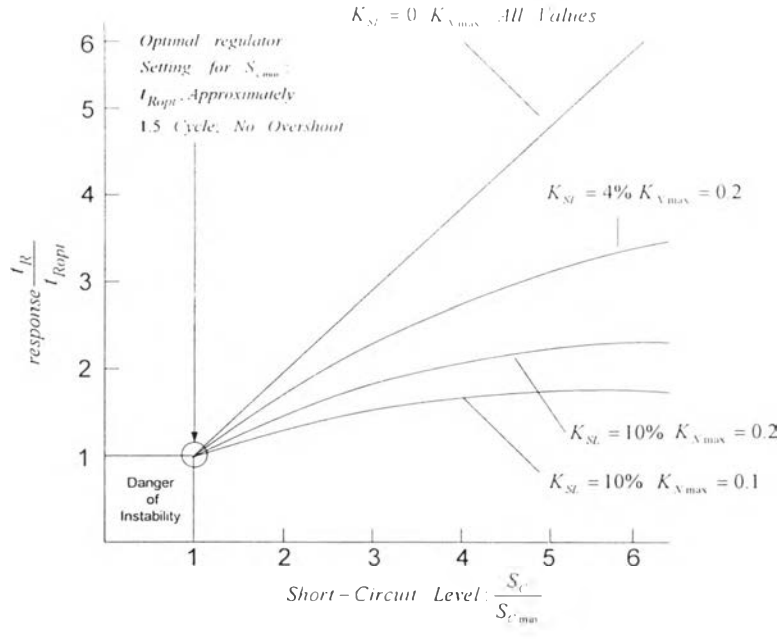
2. ผลตอบสนองทางเวลาที่เร็วที่สุดจะถูกกำหนดเมื่อ $K_N = K_{N\max}$ และในกรณีนี้จากสมการที่(6.69) จะได้ว่าค่าเวลาคงที่เป็น $T_{W\ opt} = 2T_Y = 10$ มิลลิวินาที สำหรับระบบที่มีความถี่ 50 รอบ/วินาที(Hz)

สมรรถนะของตัวควบคุมแรงดันในการรักษาเสถียรภาพเชิงแรงดันภายใต้โครงสร้างของระบบส่งไฟฟ้าจริง จะขึ้นอยู่กับความเร็วในการตอบสนองของ SVC และตำแหน่งติดตั้ง SVC ในระบบ ซึ่งตัวควบคุมจะมีความเหมาะสมที่สุด ณ ตำแหน่งที่ค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าต่ำสุด และจากสมการที่ (6.69) สามารถแสดงได้ว่า

$$\frac{T_w}{2T_Y} = \frac{T_w}{T_{w\ opt}} = \frac{K_{SL} + K_{N\max}}{K_{SL} + K_N} \tag{6.71}$$

และสมการที่(3.51)จะได้ว่า

$$\frac{T_w}{T_{w\ opt}} = \frac{K_{SL}/K_{N\max} + 1}{K_{SL}/K_{N\max} + S_{C\min}/S_C} \tag{6.72}$$



รูปที่ 3.23 ผลกระทบของกำลังไฟฟ้าลัดวงจรต่อผลตอบสนองเชิงเวลาของ SVC

สมการที่ (6.72) บ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างค่าบรรทัดฐานของผลตอบสนองทางเวลา(Normalized-Response time Constant, $T_w/T_{w,opt}$) กับค่าบรรทัดฐานของกำลังไฟฟ้าลัดวงจร(Normalized-System short-circuit level, $S_C/S_{C\min}$) ที่สามารถแสดงด้วยกราฟได้ดังรูปที่ 3.23 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าต่ำสุดจะทำให้ SVC มีค่าของเวลาตอบสนองเพิ่มขึ้นในทุกค่าความชันของกระแสดังนั้นระบบที่มีกำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่มีค่าสูงๆ เวลาตอบสนองของ SVC กับระบบจะมีค่ามากขึ้นด้วย และถ้าหากตัวควบคุมของ SVC มีค่าความชันของกระแส หรือ K_{SL} ยิ่งมาก จะยิ่งทำให้ผลตอบสนองทางเวลารวดเร็วขึ้น โดยในการสำรวจการใช้งานทั่วไปจาก [15] ระบุค่าความชันของกระแสที่ใช้ในตัวควบคุมแรงดันของ SVC นั้นจะอยู่ที่ประมาณ 3-5 %