บทที่ 5
ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชย SVC และ D-STATCOM ที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

5.1 บทนำ

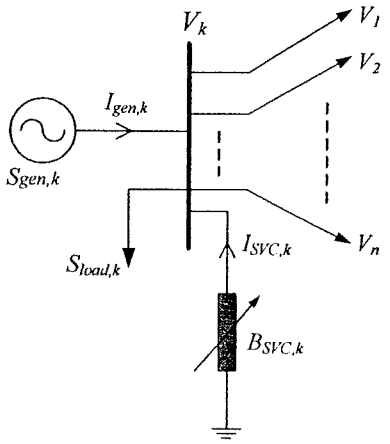
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดร่วมกับจีนเนติกอัลกอริทึมเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า 2 ชนิด คือ SVC และ D-STATCOM โดยพิจารณาจากค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยเข้าในระบบ หาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมในการชดเชยในสภาวะโหลดปกติ และสภาวะโหลดหนัก ดังนี้

5.2 แบบจำลอง SVC

อุปกรณ์ชดเชย SVC ในรูปที่ 5.1 จะถูกกำหนดให้เป็นตัวชดเชยค่าซัสเซปแตนซ์ปรับค่าได้โดยสามารถรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าภายในตัวเดียวกัน ทั้งนี้ขึ้นกับการปรับตั้งของผู้ดูแลระบบ สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้ SVC จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเพื่อชดกำลังงานสูญเสียในสภาวะโหลดปกติและสภาวะโหลดหนัก กรณีที่ SVC จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบค่าซัสเซปแตนซ์คำนวณได้จากสมการที่ (5-1) และกรณีที่ SVC รับกำลังไฟฟ้าจากระบบค่าซัสเซปแตนซ์คำนวณได้จากสมการที่ (5-2)

$$B_{SVC} = \frac{1}{X_C} \tag{5-1}$$

$$B_{SVC} = -\frac{1}{X_L} \tag{5-2}$$



รูปที่ 5.1 ตัวชดเชยค่าซัสเซปแตนซ์ปรับค่าได้ของ SVC ที่บัส k ใด ๆ

พิจารณาจากรูปที่ 5.1 SVC ถูกติดตั้งที่บัส k ใด ๆ เมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ต้องถูกดัดแปลงในตำแหน่งตามแนวทแยงมุมของบัสที่มี SVC ต่ออยู่ เมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ที่บัส k จะถูกปรับปรุง ดังนี้

$$\left[\mathbf{Y}_{\text{bus}}\right]_{k,k}^{(\text{new})} = \left[\mathbf{Y}_{\text{bus}}\right]_{k,k}^{(\text{old})} + j\left[\mathbf{B}_{SVC,k}\right] \tag{5-3}$$

5.3 แบบจำลอง D-STATCOM

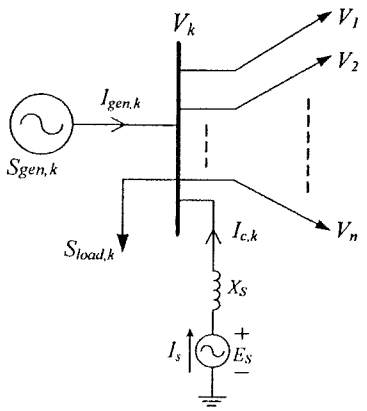
แบบจำลองอุปกรณ์ชดเชย D-STATCOM ในสภาวะคงตัวถูกเขียนแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับรีแอกแตนซ์ภายในของ D-STATCOM ดังรูปที่ 5.2 สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด แบบจำลอง D-STATCOM ในสภาวะคงตัวจะถูกเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลนอร์ตันซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสต่อขนานกับค่ารีแอกแตนซ์ โดยกระแสที่ฉีดโดย D-STATCOM คำนวณได้ดังนี้

$$I_s = \frac{E_s}{jX_s} \tag{5-4}$$

โดยที่ E_s คือ แรงดันของ D-STATCOM

X_s คือ รีแอกแตนซ์ภายในของ D-STATCOM

I_s คือ กระแสที่ฉีดโดย D-STATCOM



รูปที่ 5.2 แบบจำลอง D-STATCOM ในสภาวะคงตัวที่บัส k ใด ๆ

5.4 ผลการทดสอบ

ทำการค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของอุปกรณ์ชดเชยที่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบลดลงมากที่สุด ตัวอย่างการทำการศึกษา 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 หาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยกรณีโหลดปกติที่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุด

กรณีที่ 2 หาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยกรณีโหลด 1.5 เท่าของสภาวะโหลดปกติที่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุด

เช่นการทดสอบกับระบบทดสอบ 1 ระบบ คือ ระบบทดสอบ 34 บัส ข้อมูลของระบบ การคำนวณขอบเขตของตัวแปรที่จะค้นหา ทำได้ดังนี้

กรณี SVC กำหนดให้มีค่าพิกัดเป็น ±5000 kVar ดังนั้นจะได้ว่า

$$B_{SVC,max} = \frac{1}{X_c} = \frac{Q_{SVC,max}}{V_{rated}^2} = \frac{5000\ \text{kVar}}{V_{rated}^2} \tag{5-5}$$

$$B_{SVC,min} = -\frac{1}{X_L} = -\frac{Q_{SVC,min}}{V_{rated}^2} = -\frac{5000\ \text{kVar}}{V_{rated}^2} \tag{5-6}$$

สามารถเขียนเป็นสมการปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ดังสมการที่ (5-7)

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && P_{loss} = I^2 R \\ &\text{subject to} && B_{SVC,min} \le B_{SVC} \le B_{SVC,max} \quad \text{p.u.} \end{aligned} \tag{5-7}$$

โดยที่ P_{loss} คือ กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ

B_{SVC} คือ ค่าซัสเซปแตนซ์ของ SVC

Q_{SVC} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายโดย SVC

V_{rated} คือ พิกัดแรงดันของระบบ

กรณี D-STATCOM กำหนดให้จ่ายแรงดันเข้าสู่ระบบในช่วง 1.00-1.05 p.u. และ X_s มีค่าอยู่ในช่วง 2-10 Ω ดังนั้นจะได้ว่า

$$I_{s,max} = \frac{1.05}{jX_{s,min}} \tag{5-8}$$

$$I_{s,min} = \frac{1.00}{jX_{s,max}} \tag{5-9}$$

สามารถเขียนเป็นสมการปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ดังสมการที่ (5-10)

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && P_{loss} = I^2 R \\ &\text{subject to} && E_{s,min} \le E_s \le E_{s,max} \quad \text{p.u.} \\ &&& X_{s,min} \le X_s \le X_{s,max} \quad \Omega \end{aligned} \tag{5.10}$$

โดยที่ E_s คือ แรงดันของ D-STATCOM

X_s คือ รีแอกแตนซ์ภายในของ D-STATCOM

การค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ชดเชยสามารถทำได้โดยการหาค่าเหมาะที่สุด ในงานวิจัยนี้เลือกใช้จีนเนติกอัลกอริทึมในโปรแกรม MATLAB ร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลดโดยใช้ฟังก์ชันค่าเหมาะที่สุด คือ กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ตัวแปรที่สำคัญและค่าของตัวแปรที่เลือกใช้แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรของจีนเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB

ตัวแปรของจีนเนติกอัลกอริทึมใน MATLAB	ค่าของตัวแปรจีนเนติกอัลกอริทึมที่เลือกใช้
PopulationType	double Vector
PopulationSize	100
CrossoverFraction	0.8
Generations	100
StallGenLimit	100
StallTimeLimit	inf
CrossoverFcn	crossoverscattered
MutationFcn	mutationgaussian

1) ระบบทดสอบ 34 บัส

ระบบทดสอบ 34 บัส เป็นระบบทดสอบ 11 kV 100 kVA การค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสม สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดโดยใช้จีนเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดของ SVC และ D-STATCOM กรณีโหลดปกติ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM ในระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลดปกติ

SVC			D-STATCOM			
Bus no.	α	B_{SVC} (p.u.)	Bus no.	α	$\lvert E_s \rvert$ (p.u.)	X_s (Ω)
21	0.00	19.5113	21 – 22	0.8864	1.0299	2.0000

จากผลการทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 34 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 5.3 ในสภาวะโหลดปกติแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดที่บัส 27 ขนาด 0.94169 p.u. แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 0.95 p.u. จำนวน 6 บัส กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบทดสอบเท่ากับ 221.7235 kW เมื่อติดตั้ง SVC ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดที่บัส 21 ด้วยค่า B_{SVC} เท่ากับ 19.5113 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง SVC แสดงในตารางที่ 5.3 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้น โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 27 เพิ่มขึ้นเป็น 0.94896 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ยังต่ำกว่า 0.95 p.u. มีจำนวน 3 บัส ได้แก่บัสที่ 25, 26 และบัสที่ 27 และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 173.3875 kW โดยคิดเป็น

ร้อยละ 21.8 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด เมื่อติดตั้ง D-STATCOM ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดระหว่างบัสที่ 21 และบัสที่ 22 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 21 เป็นระยะ 0.8864 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 21 และบัสที่ 22 ด้วยค่า $|E_s|$ เท่ากับ 1.0299 p.u. และ X_s เท่ากับ 2.0000 Ω โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง D-STATCOM แสดงในตารางที่ 5.3 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้นและมีค่ามากกว่า 0.95 p.u. ทุกบัส โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 27 เพิ่มขึ้นเป็น 0.97644 p.u. และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 96.4013 kW คิดเป็นร้อยละ 56.5 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด

ตารางที่ 5.3 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM

บัส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
	ระบบปกติ	เมื่อติดตั้ง SVC	เมื่อติดตั้ง D-STATCOM
7	0.96659	0.97015	0.98048
8	0.96448	0.96805	0.97841
9	0.96202	0.96559	0.97598
10	0.96083	0.96441	0.97481
11	0.96037	0.96396	0.97436
12	0.96023	0.96382	0.97422
17	0.96595	0.97029	0.98319
18	0.96224	0.96731	0.98258
19	0.95815	0.96397	0.98217
20	0.95486	0.96136	0.98221
21	0.95199	0.95918	0.98269
22	0.94872	0.95594	0.98322
23	0.94604	0.95327	0.98063
24	0.94351	0.95077	0.97820
25	0.94230	0.94956	0.97702
26	0.94183	0.94910	0.97657
27	0.94169	0.94896	0.97644
28	0.96625	0.96981	0.98015

ตารางที่ 5.3 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM(ต่อ)

บัส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
	ระบบปกติ	เมื่อติดตั้ง SVC	เมื่อติดตั้ง D-STATCOM
29	0.96603	0.96959	0.97993
30	0.96591	0.96948	0.97982
31	0.96049	0.96407	0.97447
32	0.96015	0.96373	0.97414
33	0.95998	0.96356	0.97397
34	0.95992	0.96351	0.97391
กำลังงานสูญเสียทั้งหมด (kW)	221.7235	173.3875	96.4013

การค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ สำหรับระบบทดสอบ 34 บัส สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดโดยใช้จีนเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด จากการหาค่าเหมาะสมที่สุด ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM ในระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ

SVC			D-STATCOM			
Bus no.	α	B_{SVC} (p.u.)	Bus no.	α	$\lvert E_s \rvert$ (p.u.)	X_s (Ω)
21	0.00	30.6998	21 – 22	0.8813	1.0473	2.0000

จากผลการทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 34 บัส จะได้ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 5.5 ในสภาวะโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดที่บัส 27 ขนาด 0.90999 p.u. แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 0.95 p.u. จำนวน 24 บัส กำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบทดสอบเท่ากับ 525.3673 kW เมื่อติดตั้ง SVC ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดที่บัส 21 ด้วยค่า B_{SVC} เท่ากับ 30.6998 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง SVC แสดงในตารางที่ 5.5 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้น โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 27 เพิ่มขึ้นเป็น 0.92148 p.u. ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ยังต่ำกว่า 0.95

p.u. มีจำนวน 18 บัส และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 408.8198 kW โดยคิดเป็นร้อยละ 22.2 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด เมื่อติดตั้ง D-STATCOM ซึ่งได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดระหว่างบัสที่ 21 และบัสที่ 22 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 21 เป็นระยะ 0.8813 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 21 และบัสที่ 22 ด้วยค่า $|E_s|$ เท่ากับ 1.0473 p.u. และ X_s เท่ากับ 2.0000 Ω โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าหลังการติดตั้ง D-STATCOM แสดงในตารางที่ 5.5 จากผลการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มสูงขึ้นและมีค่ามากกว่า 0.95 p.u. ทุกบัส โดยขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 27 เพิ่มขึ้นเป็น 0.96532 p.u. และกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบลดลงเหลือ 220.5497 kW คิดเป็นร้อยละ 58.0 ของกำลังงานสูญเสียที่ลดได้ทั้งหมด

ตารางที่ 5.5 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM

บัส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
	ระบบปกติ (1.5 เท่าโหลด)	เมื่อติดตั้ง SVC	เมื่อติดตั้ง D-STATCOM
8	0.94538	0.95102	0.96762
9	0.94160	0.94726	0.96392
10	0.93978	0.94545	0.96214
11	0.93907	0.94475	0.96146
12	0.93887	0.94454	0.96125
17	0.94758	0.95441	0.97498
18	0.94185	0.94981	0.97416
19	0.93551	0.94465	0.97365
20	0.93041	0.94063	0.97384
21	0.92598	0.93726	0.97467
22	0.92091	0.93226	0.97561
23	0.91674	0.92814	0.97168
24	0.91282	0.92427	0.96798
25	0.91094	0.92241	0.96621
26	0.91021	0.92170	0.96552
27	0.90999	0.92148	0.96532

ตารางที่ 5.5 แรงดันบัสและกำลังงานสูญเสียของระบบทดสอบ 34 บัส กรณีโหลด 1.5 เท่าของโหลดปกติ เมื่อติดตั้ง SVC และเมื่อติดตั้ง D-STATCOM**(ต่อ)**

บัส	ขนาดแรงดันบัส (p.u.)		
	ระบบปกติ (1.5 เท่าโหลด)	เมื่อติดตั้ง SVC	เมื่อติดตั้ง D-STATCOM
28	0.94809	0.95371	0.97026
29	0.94775	0.95337	0.96993
30	0.94758	0.95320	0.96976
31	0.93925	0.94493	0.96163
32	0.93873	0.94441	0.96112
33	0.93847	0.94415	0.96086
34	0.93838	0.94406	0.96078
กำลังงานสูญเสียทั้งหมด (kW)	525.3673	408.8198	220.5497

5.5 สรุป

จุดประสงค์หลักของการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชย SVC และ D-STATCOM เข้าในระบบไฟฟ้าก็เพื่อช่วยป้องกันกลุ่มโหลดจากความผิดพร่องต่าง ๆ รวมถึงแรงดันตกในระบบไฟฟ้า เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้เหมือนหรือใกล้เคียงกับสภาวะปกติมากที่สุด เนื้อหาบทนี้เป็นการค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของ SVC และ D-STATCOM ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุดในกรณีที่ระบบจ่ายโหลดปกติและกรณีจ่ายโหลดหนัก ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้จีนเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด จากผลการทดสอบพบว่า ตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่ได้จากการค้นหาทำให้แรงดันไฟฟ้าโดยรวมของระบบสูงขึ้น กำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าลดลง