

บทที่ 10

การวางแผนกำลังรีแอกทีฟในระบบส่ง

10.1 บทนำ

การศึกษาในบทนี้กล่าวถึงการจัดการกำลังรีแอกทีฟในระบบส่งโดยพิจารณาเรื่องการวางแผนกำลังรีแอกทีฟ (Reactive Power Planning) โดยทั่วไป ระบบส่งประกอบด้วยเสาส่งและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่รับกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตเพื่อส่งไปยังระบบจำหน่าย เนื่องจากสายส่งในระบบส่งมีการต่อเชื่อมกันเป็นโครงข่ายที่ซับซ้อนและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในปริมาณมาก จึงทำให้เกิดปัญหาได้หลายประการ อาทิ กำลังไฟฟ้าสูญเสียและแรงดันตก นอกจากนี้ ระบบส่งจำเป็นต้องมีการควบคุมและดำเนินการอื่นๆที่เหมาะสม ทั้งในเรื่องการควบคุมความถี่ การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า การรักษาเสถียรภาพของแรงดันและกำลังไฟฟ้า รวมถึงการดูแลความมั่นคงของระบบทางเลือกหนึ่งสำหรับการควบคุมและแก้ปัญหาต่างๆในระบบส่ง คือ การใช้ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น (Flexible AC Transmission System; FACTS) เนื่องจากมีคุณสมบัติในการทำงานที่รวดเร็วและมีความเชื่อถือได้สูง

ความหมายของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น (Hingorani and Gyugyi, 2000) คือ การนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics-based Devices) หรือตัวควบคุมแบบสถิต (Static Controllers) มาใช้งานในระบบส่ง เพื่อเพิ่มขีดความสามารถทั้งการส่งกำลังไฟฟ้าและการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง อุปกรณ์ที่ใช้งานในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น เรียกว่า อุปกรณ์ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น (FACTS Devices) ซึ่งสามารถปรับค่า พารามิเตอร์ต่างๆ (เช่น ขนาดแรงดัน มุมเฟสของแรงดัน ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง) เพื่อควบคุมระบบส่งให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ อุปกรณ์ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด แต่การศึกษากครั้งนี้จะพิจารณาเพียงสองชนิด คือ ตัวชดเชยวาร์แบบสถิต (Static VAr Compensator; SVC) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบต่อขนาน (Shunt Connected Controller) และตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Controlled Series Capacitors; TCSC) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบต่ออนุกรม (Series Connected Controller)

การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นมีอยู่ด้วยกันรูปแบบ (Zhang, Rehtanz and Pal, 2006) เช่น การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า การเพิ่มขนาดกำลัง (Capacity) ของระบบส่ง การควบคุมแรงดัน การชดเชยกำลังรีแอกทีฟ การปรับปรุงเสถียรภาพและคุณภาพ

กำลังไฟฟ้าของระบบ การศึกษาในบทนี้เป็นการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นกับการวางแผนกำลังรีแอกทีฟ

การวางแผนกำลังรีแอกทีฟในระบบส่งเป็นการควบคุมขนาดแรงดันบััสเพื่อให้การส่งกำลังไฟฟ้า (ทั้งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ) ไปยังโหลดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ การส่งกำลังรีแอกทีฟในระบบส่งที่ไม่เหมาะสม เช่น การส่งกำลังรีแอกทีฟในปริมาณสูง หรือการส่งกำลังรีแอกทีฟเป็นระยะทางไกลๆ สามารถทำให้ขนาดแรงดันดันทางและขนาดแรงดันปลายทางมีค่าแตกต่างกันมาก จนอาจก่อให้เกิดปัญหาได้หลายประการ (Barot and Bhattacharya, 2007) เช่น การพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) ความขัดข้องของกริด (Grid Outage) หรืออาจทำให้เกิดเหตุการณ์ภาวะไฟฟ้าดับทั้งระบบ (Blackout)

ประโยชน์ของการวางแผนกำลังรีแอกทีฟในระบบส่ง คือ การปรับปรุงขนาดแรงดันบััส การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ การแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังของระบบ รวมทั้งทำให้การทำงานของระบบมีความเชื่อถือได้มากขึ้น การวางแผนกำลังรีแอกทีฟในระบบส่งเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดในรูปแบบของปัญหาเชิงการจัด เพราะต้องกำหนดตำแหน่งและขนาดสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมกำลังรีแอกทีฟให้เหมาะสมและบรรลุวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

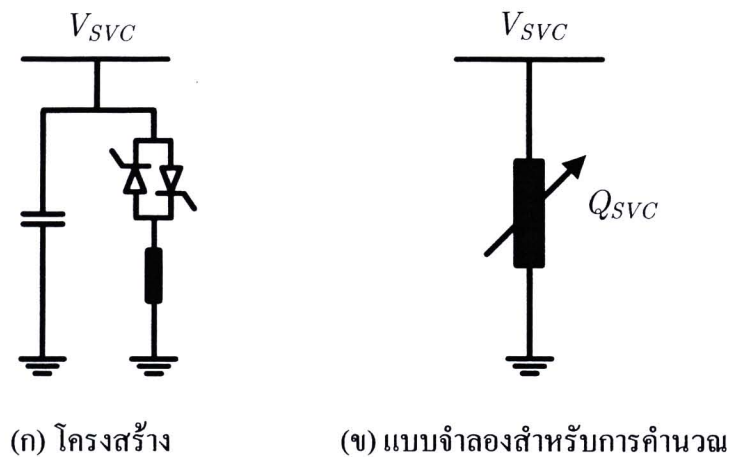
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการวางแผนกำลังรีแอกทีฟในระบบส่งด้วยตัวชดเชยวาร์แบบสถิตและตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ โดยประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวเพื่อหาผลเฉลยสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งสอง ระบบที่ใช้ทดสอบเป็นแบบจำลองระบบส่งขนาด 14 บัส และกำหนดให้ระบบที่พิจารณาเป็นระบบสมมูล

10.2 แบบจำลองสำหรับตัวชดเชยวาร์แบบสถิต

นิยามของตัวชดเชยวาร์แบบสถิต คือ แหล่งกำเนิด (Generator) หรือตัวดูดกลืน (Absorber) ชนิดต่อขนาน การปรับค่ากำลังขาออกของตัวชดเชยวาร์แบบสถิตทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนกระแสคาปาซิทีฟหรือกระแสรีแอกทีฟ (Exchange Capacitive or Reactive Currents) เพื่อควบคุมขนาดแรงดันบััส (Hingorani and Gyugyi, 2000) โครงสร้างของตัวชดเชยวาร์แบบสถิตที่สามารถควบคุมกำลังรีแอกทีฟได้อย่างต่อเนื่อง คือ การนำตัวเก็บประจุขนาดคงที่ต่อขนานกับรีแอกเตอร์ซึ่งควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Ambriz-Perez, Acha and Fuerte-Esquivel, 2000) ตามภาพที่ 10-1(ก) ในการคำนวณ ตัวชดเชยวาร์แบบสถิตจะถูกพิจารณาให้เป็นตัวรีแอกเตอร์แบบปรับค่าได้ซึ่งต่อขนานกับระบบตามภาพที่ 10-1(ข) เพื่อควบคุมขนาดแรงดัน ณ จุดติดตั้ง การศึกษาในบทนี้ ตัวชดเชยวาร์แบบสถิตจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดซึ่งจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้แก่ระบบ ถ้ากำลังรีแอกทีฟของมันมี



ค่าน้อยกว่าศูนย์ ในทางกลับกัน ถ้ากำลังรีแอกทีฟของตัวชดเชยวาร์แบบสถิตมีค่ามากกว่าศูนย์ ก็หมายถึงการทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนซึ่งเป็นโหลดที่รับกำลังรีแอกทีฟจากระบบ

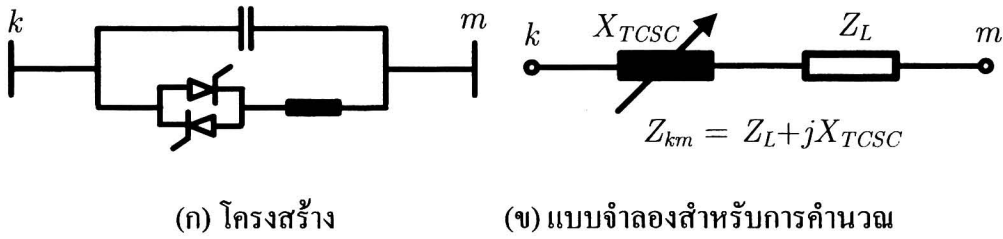


ภาพที่ 10-1 แบบจำลองสำหรับตัวชดเชยวาร์แบบสถิต

10.3 แบบจำลองสำหรับตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์

ตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์เป็นตัวชดเชยค่ารีแอกแตนซ์ที่มีโครงสร้างเป็นชุดของตัวเก็บประจุต่อขนานกับรีแอคเตอร์ซึ่งควบคุมด้วยไทรสเตอร์ตามภาพที่ 10-2(ก) (Hingorani and Gyugyi, 2000) การนำตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ไปต่ออนุกรมกับสายส่ง มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง แบบจำลองในการคำนวณจึงมีลักษณะตามภาพที่ 10-2(ข) ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ขึ้นกับระดับขั้นการชดเชย (Degree of Compensation: r_{TCSC}) ของตัวมันเอง และค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งที่ต่ออยู่ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (10-1) การศึกษาในบทนี้ ถ้าระดับขั้นการชดเชยมีค่ามากกว่าศูนย์ รีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์จะเป็นอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ ซึ่งทำให้รีแอกแตนซ์ของสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าระดับขั้นการชดเชยมีค่าน้อยกว่าศูนย์ รีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ก็จะเป็นคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ ซึ่งทำให้รีแอกแตนซ์ของสายส่งมีค่าลดลง

$$X_{TCSC} = (r_{TCSC})X_{line} \tag{10-1}$$



ภาพที่ 10-2 แบบจำลองสำหรับตัวเก็บประจุนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์

10.4 การกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขบังคับ

การศึกษาในบทนี้เปรียบเทียบแนวทางการวางแผนกำลังรีแอกทีฟในระบบส่งด้วยตัวชดเชยวาร์แบบสถิตและตัวเก็บประจุนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ เมื่อกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์ที่แตกต่างกัน 3 ลักษณะ ฟังก์ชันจุดประสงค์แรก คือ สมการที่ (10-2) ซึ่งต้องการให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์มีค่าน้อยที่สุด ฟังก์ชันจุดประสงค์ที่สอง ได้แก่ สมการที่ (10-3) ซึ่งต้องการให้มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าต่ำสุด ส่วนฟังก์ชันจุดประสงค์ที่สามมีรายละเอียดตามสมการที่ (10-4) ซึ่งต้องการให้ค่าใช้จ่ายรวม (ผลบวกของค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์และมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย) มีค่าน้อยที่สุด

$$\text{Min } F_1 = \sum_{m \in \text{NF}} \text{ICF}_m \quad (10-2)$$

$$\text{Min } F_2 = \sum_{j=1}^S (k_e \times T \times P_{\text{Loss}}) \quad (10-3)$$

$$\text{Min } F_3 = \sum_{m \in \text{NF}} \text{ICF}_m + \sum_{j=1}^S (k_e \times T \times P_{\text{Loss}}) \quad (10-4)$$

ค่าใช้จ่ายสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นสามารถคำนวณได้จาก (Cai, Erlich and Stamtssis, 2004)

$$\text{ICF}_m = (aQ_{F,m}^2 + bQ_{F,m} + c) \times Q_{F,m} \times 1,000 \quad (10-5)$$

$Q_{F,m}$ ในสมการที่ (10-5) หมายถึง ค่ากำลังรีแอกทีฟในหน่วย MVA_r ของอุปกรณ์ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นซึ่งติดตั้งที่บัส m ส่วนพจน์ $(aQ_{F,m}^2 + bQ_{F,m} + c)$ เป็นราคาต่อหน่วยของ $Q_{F,m}$ (\$/kVA_r) โดยสัมประสิทธิ์ a, b และ c สำหรับการคำนวณราคาต่อหน่วยของตัวชดเชยวาร์แบบสถิตและตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ มีรายละเอียดตามตารางที่ 10-1 (Cai, Erlich and Stamtsis, 2004)

ตารางที่ 10-1 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับคำนวณค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง

อุปกรณ์	a	b	c
ตัวชดเชยวาร์แบบสถิต	0.0003	-0.3051	127.38
ตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์	0.0015	-0.7130	153.75

เงื่อนไขบังคับในการกำหนดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ทั้งสอง ได้แก่ สมการสมดุลกำลังไฟฟ้า ขนาดแรงดันบัส ค่าขอบเขตสำหรับกำลังรีแอกทีฟของตัวชดเชยวาร์แบบสถิต หรือค่าขอบเขตสำหรับระดับขั้นการชดเชยของตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์

$$P_i = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{NB} \left| V_i V_n Y_{in} \right| \cos(\theta_{in} + \theta_n - \theta_i) \tag{10-6}$$

$$Q_i = - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{NB} \left| V_i V_n Y_{in} \right| \sin(\theta_{in} + \theta_n - \theta_i) \tag{10-7}$$

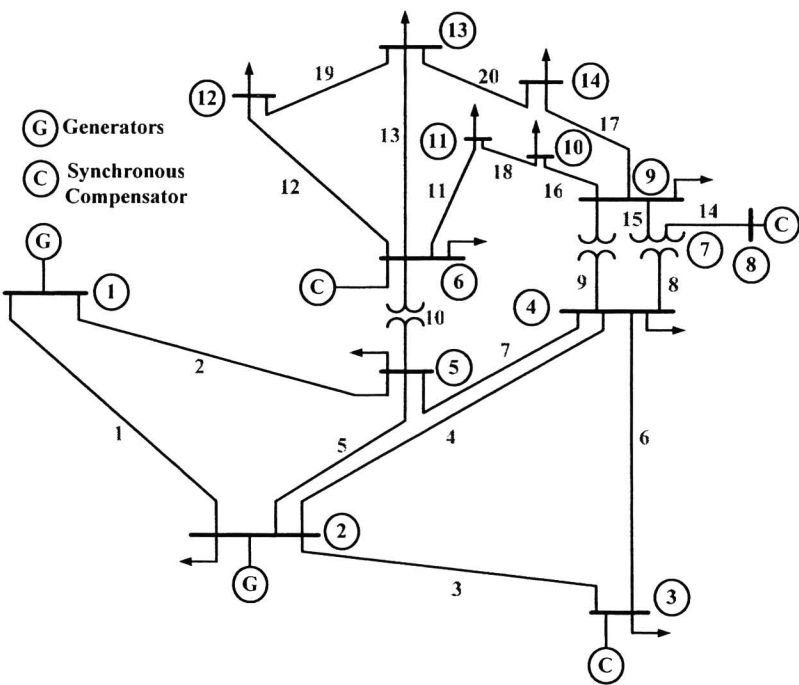
$$V^{\min} \leq |V_i| \leq V^{\max} \tag{10-8}$$

$$Q_{SVC}^{\min} \leq Q_{SVC,m} \leq Q_{SVC}^{\max} \tag{10-9}$$

$$r_{TCSC}^{\min} \leq r_{TCSC,m} \leq r_{TCSC}^{\max} \tag{10-10}$$

10.5 ข้อมูลแบบจำลองระบบส่ง

ระบบทดสอบเป็นแบบจำลองระบบส่งซึ่งดัดแปลงจากแบบจำลองระบบส่ง IEEE ขนาด 14 บัส (Pai, 2006) โดยกำหนดชื่อเป็นแบบจำลองระบบส่ง T14_S1 โครงสร้างของระบบมีลักษณะตามภาพที่ 10-3 ข้อมูลของบัสควบคุมแรงดัน (Voltage-controlled Buses) และข้อมูลโหลดได้ถูกดัดแปลงเพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้ตามรายละเอียดในตารางที่ 10-2 และตารางที่ 10-3 ส่วนข้อมูลสายส่งในตารางที่ 10-4 เป็นข้อมูลเดิมของระบบ



ภาพที่ 10-3 แบบจำลองระบบส่ง T14_S1

ตารางที่ 10-2 ข้อมูลบัสควบคุมแรงดันสำหรับแบบจำลองระบบส่ง T14_S1

หมายเลขบัส	ขนาดแรงดัน (pu)	ขีดจำกัดกำลังรีแอทีฟ (MVar)	
		ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
2	1.045	-40	25.0
3	1.010	0.0	20.0
6	1.070	-6.0	12.0
8	1.090	-6.0	12.0

ตารางที่ 10-3 ข้อมูลโหลดสำหรับแบบจำลองระบบส่ง T14_S1

หมายเลข	P_D	Q_D	Q_C	หมายเลข	P_D	Q_D	Q_C
บัส	(MW)	(MVar)	(MVar)	บัส	(MW)	(MVar)	(MVar)
1	-	-	-	8	-	-	-
2	21.7	25.4	-	9	29.5	33.2	19.0
3	94.2	38.0	-	10	9.0	11.6	-
4	47.8	-7.8	-	11	3.5	3.6	-
5	7.6	3.2	-	12	6.1	3.2	-
6	11.2	15.0	-	13	13.5	11.6	-
7	-	-	-	14	14.9	10.0	-

ตารางที่ 10-4 ข้อมูลสายส่งของแบบจำลองระบบส่ง T14_S1

หมายเลข	หมายเลขบัส	หมายเลขบัส	$R(pu)$	$X(pu)$	$\frac{B}{2}(pu)$	ตำแหน่งปรับตั้ง
สายส่ง	ปลายด้านส่ง	ปลายด้านรับ				หม้อแปลง
1	1	2	0.01938	0.05917	0.02640	-
2	1	5	0.05403	0.22304	0.02640	-
3	2	3	0.04699	0.19797	0.02190	-
4	2	4	0.05811	0.17632	0.01870	-
5	2	5	0.05695	0.17388	0.01700	-
6	3	4	0.06701	0.17103	0.01700	-
7	4	5	0.01335	0.04211	0.00640	-
8	4	7	-	0.20912	-	0.978
9	4	9	-	0.55618	-	0.969
10	5	6	-	0.25202	-	0.932
11	6	11	0.09498	0.19890	-	-
12	6	12	0.12291	0.25581	-	-
13	6	13	0.06615	0.13027	-	-
14	7	8	-	0.17615	-	-
15	7	9	-	0.11001	-	-
16	9	10	0.03181	0.08450	-	-
17	9	14	0.12711	0.27038	-	-
18	10	11	0.08205	0.19207	-	-
19	12	13	0.22092	0.19988	-	-
20	13	14	0.17093	0.34802	-	-

10.6 ข้อมูลการคำนวณ

ค่ากำลังไฟฟ้าฐานสำหรับการคำนวณ คือ 100 MVA ขนาดแรงดันที่บัสอ้างอิงเท่ากับ 1.06 pu มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียคิดจากพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในรอบหนึ่งปี (8,760 ชั่วโมง) และให้ k_e มีค่าเท่ากับ 60\$/MWh

สำหรับเงื่อนไขบังคับ $V^{\min}$ และ $V^{\max}$ มีค่าเท่ากับ 0.90 pu และ 1.10 pu ตัวชดเชยวาร์แบบสถิตมีค่าขีดจำกัด $Q_{SVC}^{\min}$ และ $Q_{SVC}^{\max}$ เท่ากับ -100 และ 100 MVar ส่วนตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์มีค่าขีดจำกัดระดับขั้นการชดเชย $r_{TCSC}^{\min}$ และ $r_{TCSC}^{\max}$ เท่ากับ -0.7 และ 0.2

เมื่อติดตั้งตัวชดเชยวาร์แบบสถิต ความต้องการกำลังรีแอกทีฟของโหลด ณ บัสที่ติดตั้งจะถูกปรับแก้ตามขนาดกำลังรีแอกทีฟของตัวชดเชยวาร์แบบสถิต ในขณะที่การติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งที่มีการติดตั้ง จะถูกปรับแก้ตามระดับขั้นการชดเชยและค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง จากนั้น จึงคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและขนาดแรงดันบัส

10.7 การใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในการแก้ปัญหา

ตัวแปรตัดสินใจสำหรับปัญหาการวางแผนกำลังรีแอกทีฟในระบบส่งด้วยตัวชดเชยวาร์แบบสถิตและตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ ประกอบด้วยตำแหน่งติดตั้งและขนาดปรับตั้งของอุปกรณ์ อนุภาคที่ใช้แทนผลเฉลยของการติดตั้งตัวชดเชยวาร์แบบสถิตมีรายละเอียดตามสมการที่ (10-11) ถึงสมการที่ (10-13) ส่วนอนุภาคซึ่งใช้แทนผลเฉลยของการติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ มีรายละเอียดตามสมการที่ (10-14) ถึงสมการที่ (10-16)

$$\bar{x}_{SVC} = [\bar{B}_{SVC} \quad \bar{Q}_{SVC}] \quad (10-11)$$

$$\bar{B}_{SVC} = [BS_1 \quad BS_2 \quad \dots \quad BS_t \quad \dots \quad BS_{NF}] \quad (10-12)$$

$$\bar{Q}_{SVC} = [Q_{SVC,1} \quad Q_{SVC,2} \quad \dots \quad Q_{SVC,t} \quad \dots \quad Q_{SVC,NF}] \quad (10-13)$$

$$\bar{x}_{TCSC} = [\bar{L}_{TCSC} \quad \bar{r}_{TCSC}] \quad (10-14)$$

$$\bar{L}_{TCSC} = [LT_1 \quad LT_2 \quad \dots \quad LT_t \quad \dots \quad LT_{NF}] \quad (10-15)$$

$$\bar{r}_{TCSC} = [r_{TCSC,1} \quad r_{TCSC,2} \quad \dots \quad r_{TCSC,t} \quad \dots \quad r_{TCSC,NF}] \quad (10-16)$$

สำหรับพารามิเตอร์ของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในการหาผลเฉลย ได้กำหนดให้อนุภาคในกลุ่มประกอบด้วย 100 อนุภาค และจำนวนรอบการคำนวณสูงสุดเท่ากับ 150 รอบ การกระตุ้นกลุ่มอนุภาคเกิดขึ้นเมื่อค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายใน 30 รอบการคำนวณ ความเร็วของอนุภาคเมื่อไม่มีการกระตุ้น ให้คำนวณจาก

$$v_{id}^{t+1} = wv_{id}^t + c_1 r_{1d}^t (pbest_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_{2d}^t (gbest_d^t - x_{id}^t) \quad (10-17)$$

ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อยมีค่าลดลงอย่างเชิงเส้นจาก 0.9 ในการคำนวณรอบแรกจนเหลือ 0.4 ในการคำนวณรอบสุดท้าย ส่วน c_1 และ c_2 มีค่าเท่ากับ 2.0

10.8 กรณีศึกษาที่พิจารณา

กรณีศึกษาที่พิจารณาทั้งหมดแบ่งตามอุปกรณ์ที่ติดตั้งและฟังก์ชันจุดประสงค์ที่เลือกใช้ โดยประกอบด้วย

1. กรณีศึกษา S1, S2 และ S3 สำหรับการติดตั้งตัวชดเชยวาร์แบบสถิต
2. กรณีศึกษา T1, T2 และ T3 สำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์

ตัวเลขที่ปรากฏในกรณีศึกษาต่างๆ ทำหน้าที่กำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์ โดยหมายเลข 1 หมายถึง ฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ต้องการให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์มีค่าน้อยที่สุด ส่วนหมายเลข 2 หมายถึง ฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ต้องการให้มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าต่ำสุด และหมายเลข 3 หมายถึง ฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ต้องการให้ผลรวมของค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้ จำนวนตัวชดเชยวาร์แบบสถิตหรือตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ ซึ่งจะติดตั้งได้ในแต่ละกรณีศึกษาต้องไม่เกิน 5 ตัว

10.9 ผลที่ได้จากกรณีศึกษา

เมื่อไม่มีการวางแผนกำลังรีแอกทีฟ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียและมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบในระยะเวลาหนึ่งปีมีค่าประมาณ 151,320 MWh และ 9,079,140 เหรียญสหรัฐอเมริกา ขนาดแรงดันบัสมีรายละเอียดตามภาพที่ 10-4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ขนาดแรงดันสูงสุดในระบบมีค่าเท่ากับ 1.06 pu ที่บัสอ้างอิง และขนาดแรงดันต่ำสุดในระบบเท่ากับ 0.8663 pu ที่บัสหมายเลข 14 โดยบัสซึ่งขนาดแรงดันไม่เป็นไปตามเงื่อนไขบังคับที่กำหนด (ขนาดแรงดันต่ำกว่า 0.90 pu) ได้แก่ บัสหมายเลข 10, 12, 13 และ 14

แนวทางการติดตั้งตัวชดเชยวาร์แบบสถิตและตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ของกรณีศึกษาต่างๆ ซึ่งได้จากผลเฉลยของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวได้แสดงไว้ในตารางที่ 10-5 และตารางที่ 10-6 ขนาดแรงดันบัสมของกรณีศึกษาต่างๆ มีรายละเอียดภาพที่ 10-5 และภาพที่ 10-6 ส่วนการเปรียบเทียบผลที่ได้จากกรณีศึกษาทั้งหมดได้แสดงไว้ในตารางที่ 10-7 และภาพที่ 10-7 ถึงภาพที่ 10-9

ตารางที่ 10-5 รายละเอียดการติดตั้งตัวชดเชยวาร์แบบสถิต

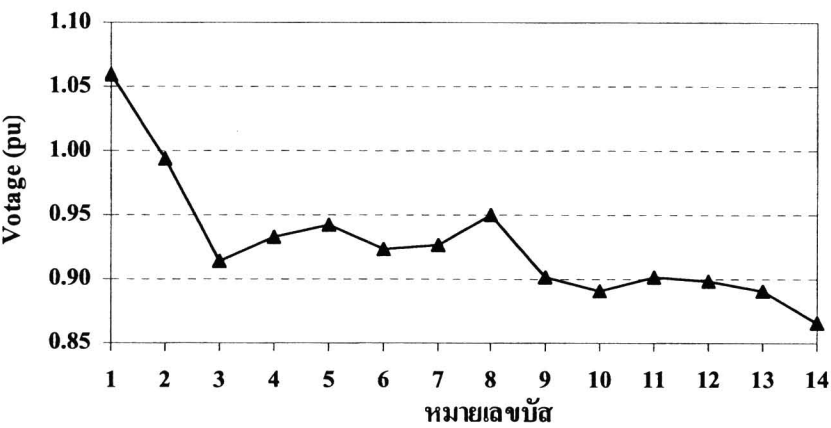
กรณีศึกษา S1		กรณีศึกษา S2		กรณีศึกษา S3	
หมายเลขบัส	$Q_{SVC}(MVar)$	หมายเลขบัส	$Q_{SVC}(MVar)$	หมายเลขบัส	$Q_{SVC}(MVar)$
-	-	5	-41.09	-	-
-	-	7	-27.88	-	-
-	-	10	-13.65	-	-
-	-	13	-13.05	-	-
14	-6.74	14	-10.31	14	-6.74

ตารางที่ 10-6 รายละเอียดการติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์

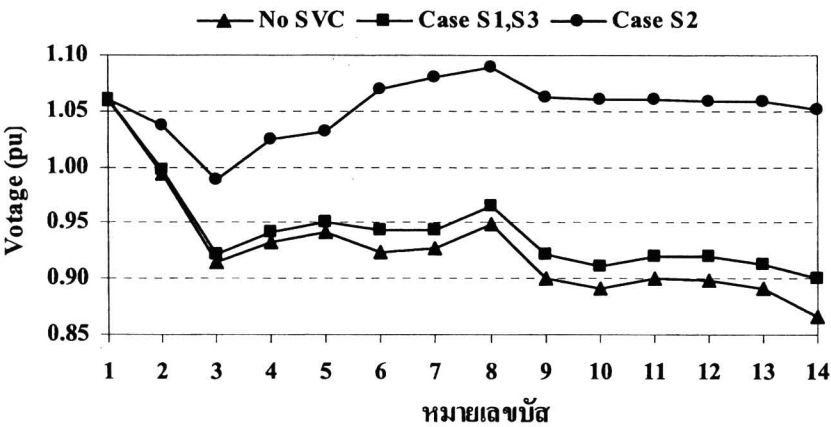
กรณีศึกษา T1		กรณีศึกษา T2		กรณีศึกษา T3	
หมายเลขสายส่ง	r_{TCSC}	หมายเลขสายส่ง	r_{TCSC}	หมายเลขสายส่ง	r_{TCSC}
2	-0.3191	2	-0.4707	2	-0.3191
15	-0.1484	4	-0.2706	15	-0.1484
17	-0.7000	5	-0.4714	17	-0.7000
19	-0.3161	15	-0.7000	19	-0.3161
20	-0.6793	17	-0.3939	20	-0.6793

ตารางที่ 10-7 ผลจากกรณีศึกษาทั้งหมด

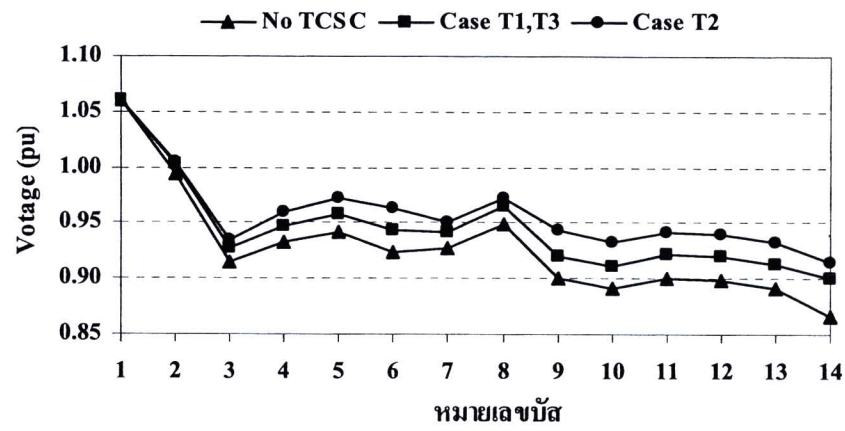
กรณีศึกษา	มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (\$)	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง (\$)	ค่าใช้จ่ายรวม (\$)	มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง (\$)	ระยะเวลาคืนทุน (ปี)
ไม่มีการติดตั้ง	9,079,200	-	9,079,200	-	-
S1 และ S3	8,668,140	844,763	9,512,903	411,060	2.06
S2	7,129,860	12,636,121	19,765,981	1,949,340	6.48
T1 และ T3	8,708,160	125,143	8,833,303	371,040	0.34
T2	8,619,300	1,849,719	10,469,019	459,900	4.02



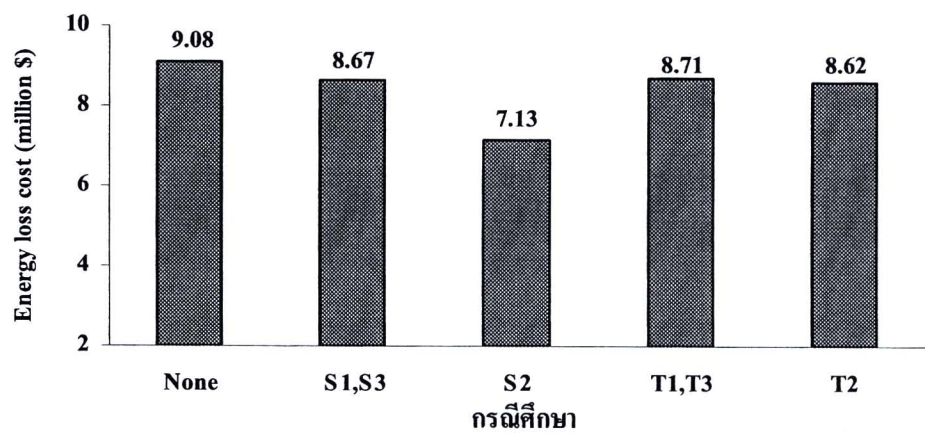
ภาพที่ 10-4 ขนาดแรงดันบัสเมื่อไม่มีการวางแผนกำลังรีแอกทีฟ



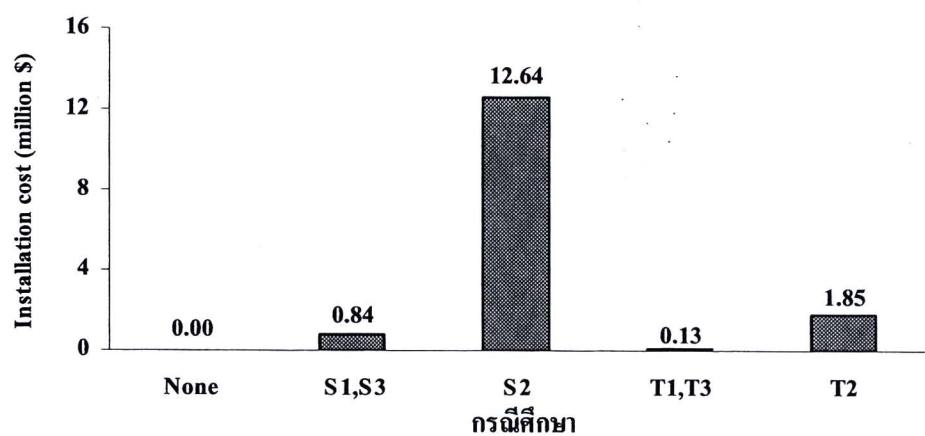
ภาพที่ 10-5 แรงดันบัสของกรณีศึกษาการติดตั้งตัวชดเชยวาร์แบบสถิต



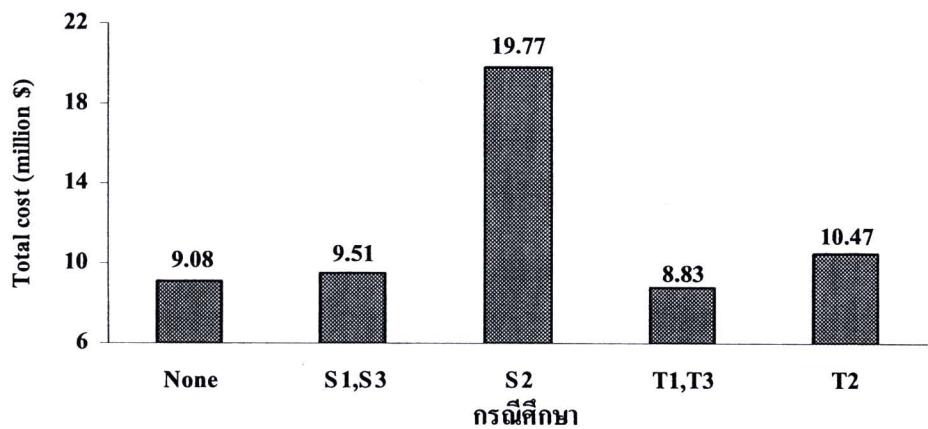
ภาพที่ 10-6 แรงดันบัสของของกรณีศึกษาการติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์



ภาพที่ 10-7 มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของกรณีศึกษาทั้งหมด



ภาพที่ 10-8 ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ของกรณีศึกษาทั้งหมด



ภาพที่ 10-9 ค่าใช้จ่ายรวมของกรณีศึกษาทั้งหมด

สำหรับกรณีศึกษา S1 ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวกำหนดให้ติดตั้งตัวชดเชยวาร์แบบสถิตเพียงตัวเดียวที่บัสหมายเลข 14 โดยจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้แก่ระบบ 6.74 MVar สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากฟังก์ชันจุดประสงค์ต้องการให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งมีค่าน้อยที่สุด ตัวชดเชยวาร์แบบสถิตจึงต้องติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสมด้วยปริมาณกำลังรีแอกทีฟที่น้อยที่สุด การติดตั้งตัวชดเชยวาร์แบบสถิตในกรณีศึกษานี้ ทำให้มูลค่าพลังงานไฟฟ้าในรอบหนึ่งปีมีค่าลดลงประมาณ 411,060 เหรียญสหรัฐอเมริกา (ร้อยละ 4.53) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการติดตั้ง และยังช่วยปรับปรุงขนาดแรงดันบัสให้สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับที่กำหนด โดยขนาดแรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย การติดตั้งตัวชดเชยวาร์แบบสถิตในกรณีศึกษานี้มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 844,763 เหรียญสหรัฐอเมริกา

กรณีศึกษา S2 ซึ่งต้องการให้มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวกำหนดให้ติดตั้งตัวชดเชยวาร์แบบสถิตครบตามจำนวนที่กำหนด (5 ตัว) โดยติดตั้งที่บัสหมายเลข 5, 7, 10, 13 และ 14 เพื่อจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้แก่ระบบตามค่าในตารางที่ 10-5 มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมภายหลังการติดตั้งมีค่าลดลงประมาณ 1,949,340 เหรียญสหรัฐอเมริกา (ร้อยละ 21.47) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการติดตั้ง นอกจากนี้ ขนาดแรงดันบัสก็ได้รับการปรับปรุงให้มีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยแรงดันบัสภายหลังการติดตั้งในกรณีศึกษานี้มีขนาดค่อนข้างสูง โดยบัสหมายเลข 6 ถึงหมายเลข 14 มีขนาดแรงดันมากกว่า 1.05 pu เงินลงทุนของการติดตั้งในกรณีศึกษานี้มีค่าสูงถึง 12,636,121 เหรียญสหรัฐอเมริกา ซึ่งสูงกว่ากรณีศึกษา S1 ประมาณ 15 เท่า

สำหรับกรณีศึกษา S3 ซึ่งต้องการให้ค่าใช้จ่ายรวม (ผลบวกของมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียและค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง) มีค่าน้อยที่สุด วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวได้ให้ผลลัพธ์เหมือนกับ

กรณีศึกษา S1 สาเหตุเนื่องจากเงินลงทุนในการติดตั้งตัวชดเชยวาร์แบบสถิตมีราคาสูง จนแสดงความเด่น (Dominant) ในฟังก์ชันจุดประสงค์มากกว่ามูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย ดังนั้น ถ้าต้องการให้ค่าใช้จ่ายรวมมีค่าน้อยที่สุด ก็ต้องจำกัดเงินลงทุนสำหรับการติดตั้งตัวชดเชยวาร์แบบสถิตให้น้อยที่สุด ซึ่งก็คือกรณีศึกษา S1 นั่นเอง

เมื่อพิจารณากรณีศึกษาการติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ โดยเริ่มจากกรณีศึกษา T1 ซึ่งต้องการให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งมีค่าน้อยที่สุด ผลเฉลยจากวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวกำหนดตำแหน่งการติดตั้งที่สายส่งหมายเลข 2, 15, 17, 19 และ 20 โดยมีค่าระดับชั้นการชดเชยตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 10-6 การติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ในกรณีศึกษานี้ แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการวางแผนกำลังรีแอกทีฟในระบบส่งได้อย่างชัดเจน เพราะนอกจากช่วยปรับปรุงขนาดแรงดันบัสให้สอดคล้องเงื่อนไขบังคับแล้ว ยังทำให้มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าลดลง 371,040 เหรียญสหรัฐอเมริกา (ร้อยละ 4.09) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการติดตั้ง โดยใช้เงินลงทุนติดตั้ง 125,143 เหรียญสหรัฐอเมริกา ซึ่งจะเห็นได้ว่ามูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงมีค่ามากกว่าเงินลงทุนที่ใช้ในการติดตั้ง

ในกรณีศึกษา T2 ซึ่งต้องการให้มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวได้ให้ผลเฉลยตามรายละเอียดในตารางที่ 10-6 โดยทำให้มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าลดลง 459,900 เหรียญสหรัฐอเมริกา (ร้อยละ 5.06) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการติดตั้ง สำหรับขนาดแรงดันบัส เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 10-6 พบว่า ขนาดแรงดันบัสของกรณีศึกษา T2 มีค่าสูงกว่าขนาดแรงดันบัสของกรณีศึกษา T1 เพียงเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียก็จะพบว่า กรณีศึกษา T2 มีมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียต่ำกว่ากรณีศึกษา T1 เท่ากับ 88,860 เหรียญสหรัฐอเมริกา แต่กรณีศึกษา T2 มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 1,849,719 เหรียญสหรัฐอเมริกา ซึ่งสูงกว่าค่าใช้จ่ายในการติดตั้งของกรณีศึกษา T1 ประมาณ 14.8 เท่า

เมื่อพิจารณากรณีศึกษา T3 ซึ่งต้องการให้ค่าใช้จ่ายรวมมีค่าน้อยที่สุด การติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์จะเหมือนกับกรณีศึกษา T1 เพราะเงินลงทุนในการติดตั้งมีราคาสูง จนแสดงความเด่นในฟังก์ชันจุดประสงค์มากกว่ามูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย เมื่อต้องการให้ค่าใช้จ่ายรวมมีค่าน้อยที่สุด ก็ต้องจำกัดเงินลงทุนสำหรับการติดตั้งให้น้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ซึ่งคำนวณจากมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงและเงินลงทุนในการติดตั้ง พบว่า การติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ในกรณีศึกษา T1 และ กรณีศึกษา T3 มีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุดประมาณ 4 เดือน ส่วนกรณีศึกษาอื่นๆ ระยะเวลาคืนทุนมีค่าประมาณ 2 ปี ถึง 6 ปีครึ่ง ซึ่งจะเห็นได้ว่า หากพิจารณาเฉพาะประโยชน์ที่ได้

จากการลดลงของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเพียงอย่างเดียว การติดตั้งอุปกรณ์ทั้งสองอาจไม่คุ้มค่า อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอุปกรณ์ทั้งสองมีระยะเวลาการทำงานที่ไม่มีปัญหา (Trouble-free Operation) ประมาณ 15 ปี (Cepek and Krishnayya, 1998) ซึ่งมากกว่าระยะเวลาคืนทุน และยังช่วยปรับปรุงระบบส่งในด้านอื่น เช่น การปรับปรุงเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ การลดค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิต ถ้าประโยชน์เหล่านี้ได้รับการประเมินและนำมาใช้คำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ก็จะให้เห็นประโยชน์ของการติดตั้งตัวชดเชยวาร์แบบสถิตและตัวเก็บประจุอนุกรมด้วยไทริสเตอร์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น