

# บทที่ 11. Reactive power plant

## 1 บทนำ

ในเวลาจ่ายไฟจะพบว่ามีกระแส 2 ส่วน คือ

- ส่วนที่เรียกว่า active current ทำให้เกิด active power ที่จะใช้จ่ายกำลัง power ให้ load
- ส่วนที่เรียกว่า reactive current ทำให้เกิด reactive power ส่วนนี้ ไม่ให้ power ที่เป็นประโยชน์กับ load ที่ต่ออยู่ อาจเป็นได้ทั้งกระแสชนิด inductive และ capacitive

ส่วนหลังนี้ทำให้ generator มี load เพิ่มขึ้น ทั้งยังทำให้หม้อแปลงต้องถูกจำกัดการจ่าย active power ไปที่ load เกิด loss เพิ่มขึ้นในสาย conductor หากลดกระแสส่วนนี้ได้ก็จะทำให้สามารถ ผลิต/ส่ง active power ได้มากขึ้น

การต่อ reactive compensator ขนานกับ load หรือ สายส่งเป็นวิธีลดกระแสส่วนนี้ให้ต่ำลง

## 2. compensator

เนื่องจากส่วนที่เป็น reactive power ทำให้กระแสรวมเพิ่มสูงขึ้น เกิด voltage drop และ losses เพิ่มขึ้นในลวดตัวนำที่กระแสทั้งหมดไหลผ่าน

อุปกรณ์ที่ใช้ลด reactive power ได้แก่

2.1 ชนิด uncontrolled reactive compensation เป็นชนิดต่อ fix ไม่มีการปลด-สับ เช่น shunt reactor / shunt capacitor bank ที่ใช้จำนวนหนึ่ง unit หรือ หนึ่ง bank ต่อขนานเข้ากับระบบจำหน่ายโดยต่อผ่าน fuse ไม่สามารถปรับค่าได้

2.2 ชนิด controlled reactive compensation สามารถปรับค่าได้เพื่อควบคุม parameter บางตัวของระบบที่ต้องการ ได้แก่

2.2.1 synchronous condenser เป็น rotating machine

- under excited synchronous machine เมื่อต้องการใช้เป็น inductive loads
- over excited synchronous machine เมื่อต้องการใช้เป็น capacitive loads

2.2.2 static var compensator มีการออกแบบได้หลายรูปแบบ เช่น

- shunt capacitor bank/shunt reactor bank ที่ใช้ circuit breaker เป็นตัวสับเข้า-ปลดออก โดยออกแบบแบ่งเป็น step/bank สามารถใช้งานตามจำนวน reactive power ที่ต้องการลด เรียกว่า mechanically switched reactor/capacitor
- continuous controlled โดยใช้ thyristor เป็นตัวตัดต่อที่สามารถควบคุมให้ได้ปริมาณ reactive var ที่ต้องการ ได้แก่ thyristor controlled reactor :TCR
- discontinuous controlled ใช้ thyristor เป็นตัวตัดต่อที่แทน circuit breaker สามารถ

ควบคุมให้ทั้ง bank เข้า-ออกได้ ได้แก่ thyristor switched capacitor :TSC และ thyristor switched reactor : TSR

อุปกรณ์เหล่านี้สามารถใช้ร่วมกันได้ การใช้ร่วมกันเรียกว่า static var compensation : SVC ทำหน้าที่เป็น reactive plant

### 3. mechanically switched capacitor

ในระบบ distribution จะใช้ capacitor unit หรือ capacitor bank ขนาดเล็กๆ ติดตั้งที่เสาคู่ต่อเข้า line ผ่าน fuse ในกรณีที่ bank มีขนาดใหญ่ขึ้น อาจใช้ switcher แทน fuse ในสถานีจำเป็นต้องใช้ bank ขนาดใหญ่มี แรงดัน และ mvar สูง จะใช้ circuit breaker เป็นตัวปลด-สับพร้อมมีระบบป้องกัน ปกติจะมี reactor ขนาดเล็กๆ ต่อ series กับ capacitor เพื่อทำหน้าที่ลด inrush current หรือ transient ที่เกิดขึ้นขณะ energize ถ้ามีขนาดใหญ่จะทำหน้าที่ลดกระแส harmonic

ข้อควรระวังคือ การเกิด pre-strike หรือ re-strike ในขณะที่ breaker ทำงาน close และ open ซึ่งจะทำให้เกิด transient over voltage

output ระหว่าง U-I จะ linear แต่ขณะที่แรงดันเปลี่ยนไป ค่า reactive power จะเปลี่ยนไปตาม factor ของ (ratio ของ U) <sup>2</sup>

การ energize การใช้งานประจำวันหากต้องปลด-สับหลายๆ ครั้ง ควร energize ขณะที่ capacitor ไม่มี trap charge หรือ เหลืออยู่ในระดับ 50-70 volt ซึ่งต้องมีอุปกรณ์สำหรับ discharge เช่น discharge resistor

harmonic capacitor unit จะมี load เพิ่มขึ้นจากกระแส harmonics ลำดับต่างๆ ที่ไหลผ่าน และเกิด voltage stresses ที่ capacitor element

losses ปกติจะน้อยมาก เกิดจาก dielectric loss, film loss, connecting/internal fuse loss และ discharge resistor loss

over voltage / over current ค่อนข้างจะมีผลและอิทธิพล (sensitive) ต่อ shunt capacitor จึงต้องมีระบบป้องกัน ซึ่งใช้หลักการของ unbalance เช่น unbalance voltage relay, unbalance current relay

วัตถุประสงค์ในการใช้ capacitor bank

- เป็น voltage support ในระบบที่ weak
- ปรับปรุง power factor

#### 3.1. การออกแบบ capacitor bank

การออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึง

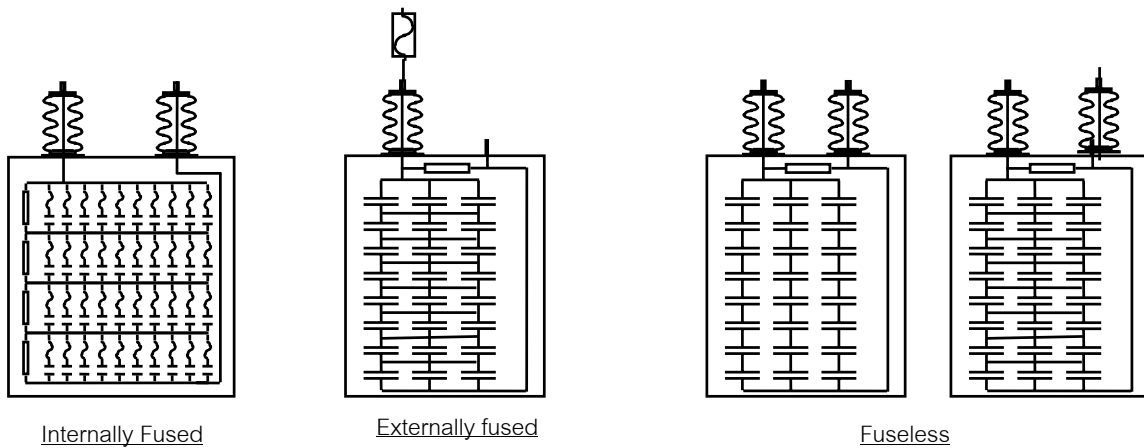
- ความปลอดภัยในการใช้งานและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

- capacitor unit หรือกระป๋องต้องกำหนดขนาด แรงดันที่เหมาะสม
- ลักษณะการต่อแต่ละ unit เพื่อทำเป็น bank
- สภาพการใช้งาน

### 3.2 capacitor unit

capacitor unit แบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้เป็น 3 ชนิด

1. internally fused
2. fuseless
3. externally fused



capacitor unit ต้องมี discharge resistor ต่ออยู่ภายในเพื่อลดแรงดันของ trap charge หลังจากปลดออกจากระบบเพื่อให้เหลือแรงดันไม่เกิน 50-70 volt ภายในเวลา 5-10 นาที สามารถคำนวณหาค่า discharge resistor : R ได้จาก สมการ

$$R \cdot \ln(V\sqrt{2}/U_R) = t / C \text{ megaohm}$$

V = rated voltage : kV

$U_R$  = residual voltage : kV

C = capacitance :  $\mu F$

t = discharge time : min.

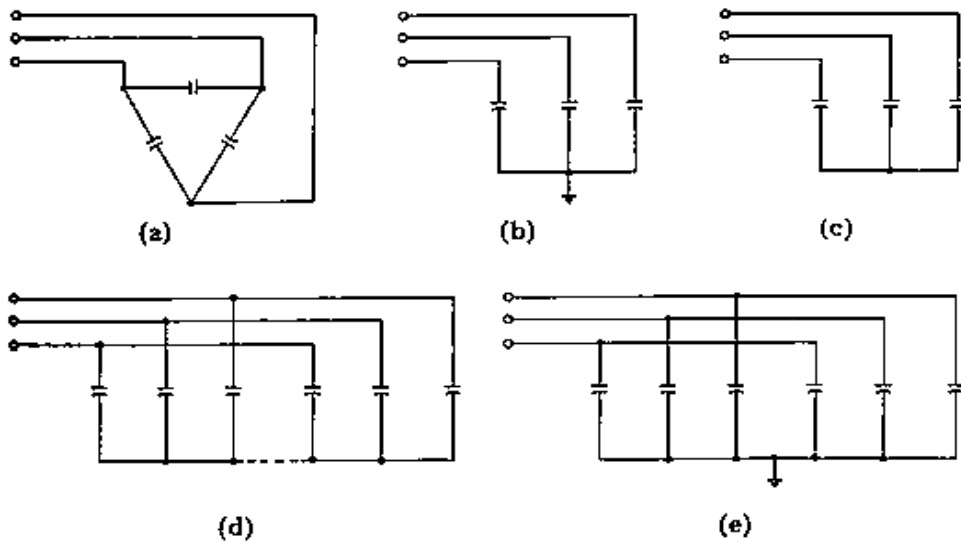
แต่ละกระป๋องต้องทนแรงดันที่เกิดขึ้นจาก internal fault (brusting pressure) ได้โดยที่ตัวถังต้องไม่ปริหรือแตกออก

dielectric fluid ที่ใช้ต้องไม่มีสาร PCB เจือปนและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

การกำหนด output kVAR ต่อกระป๋อง ควรทำให้เป็นมาตรฐานเพื่อให้สามารถกำหนดขนาดของกระป๋อง (dimension) ที่จะนำไปติดตั้ง และเป็นการจำกัด spare ไม่ให้มีหลายขนาด

### 3.3 การต่อ bank สามารถต่อใช้งานได้หลายลักษณะ เช่น

- a) Delta
- (b) Ground Y
- (c) Ungrounded Y
- (d) Ungrounded Double Y-Neutrals
- (e) Ground Double Y



ในระบบแรงสูง capacitor bank ที่ติดตั้งในสถานี่มีการต่อใช้งานเป็น 3 ลักษณะดังนี้

- แรงดัน 22/33 kV : ungrounded bank ที่ต่อเป็นแบบ wye จะใช้ voltage transformer ต่อ ระหว่าง จุด neutral กับ ground เพื่อใช้กับระบบป้องกันที่ตรวจวัด unbalance voltage ของ neutral point หรือ จะต่อเป็นแบบ wye-wye ใช้ current transformer (CT) ต่อระหว่าง จุด neutral ของแต่ละ wye เชื่อมผ่าน CT เข้าหากัน เพื่อใช้กับระบบป้องกันที่ตรวจวัด unbalance current ใน neutral wire
- แรงดัน 69/115 kV: ungrounded bank ที่ต่อเป็นแบบ wye-wye (หรือ double wye) neutral tied, จะใช้ current transformer (CT) ต่อระหว่าง จุด neutral ของแต่ละ wye เชื่อมผ่าน CT เข้าหากัน เพื่อใช้กับระบบป้องกันที่ตรวจวัด unbalance current ใน neutral wire
- แรงดัน 230 kV: grounded bank ที่ต่อเป็นแบบ wye-wye (หรือ double wye) neutral tied/grounded, หรือ H connection หรือ hybrid connection, ในระบบแรงสูงจำเป็นต้องนำ capacitor หลาย unit ต่อ series กัน จึงอาจเปลี่ยนตำแหน่งของ unbalance CT ไปอยู่ที่จุดเชื่อมต่อของ capacitors ตำแหน่งที่เป็นลำดับของ group เดียวกันของแต่ละ wye เข้าหากัน และอาจต่อ neutral ของ bank ลง ground

### 3.4 การลดหรือจำกัด(limit) ค่า inrush current ในขณะ energize

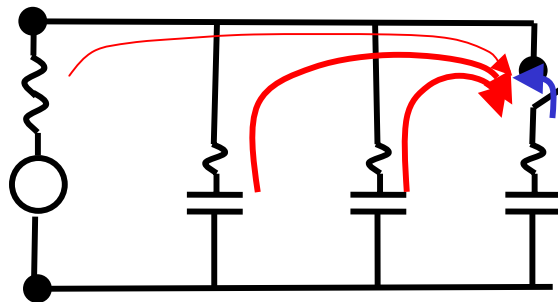
ขณะที่ energize capacitor bank ที่ถูก discharge แล้วหรือไม่มี trap charge เหลืออยู่แล้ว จะเหมือนเกิดลัดวงจร (short circuit) bank จะสร้าง inrush current สูงมากโดยเฉพาะ energize ในขณะแรงดันระบบเป็น peak การ energize เพียงหนึ่ง bank เรียกว่า isolated bank

inrush current จะรุนแรงมากที่สุดขณะ energize ชนิด back to back คือ การ energize ขณะแรงดันระบบเป็น peak ขนานกับ bank / banks ที่ใช้งานอยู่ energized bank/banks จะ discharge พลังงานของประจุเข้าสู่ energizing bank กระแสสูงสุดจะเกิดขณะนำ bank สุดท้ายเข้าใช้ เพราะ existing bank จะมี reactance ลดลงเหลือเท่ากับ  $(L/n-1)$  และ capacitance เพิ่มเป็น  $(n-1)C$

การลดค่า inrush current จะใช้ current limiting reactor ต่อ series กับ bank เพื่อลด oscillating frequency และเพิ่ม impedance ในช่วงแรกของ inrush

#### 3.4.1 การคำนวณขนาด inrush current

กรณี back to back switching (เมื่อมี bank อื่นสับเข้าอยู่ก่อน)



$$I_{pk} = \sqrt{\frac{2 \cdot Q_i \cdot Q_n}{3 \cdot (Q_i + Q_n) \omega \cdot L_{eq}}}$$

$$L_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_{n-1}}} + L_n$$

$I_{pk}$  = inrush current peak

$Q$  = MVar of capacitor bank

$Q_i$  =  $Q_1 + Q_2 + \dots + Q_{n-1}$

$Q_n$  =  $Q$  ของ bank ที่จะ switching เข้า

$L_{eq}$  = inductance series รวมทุก bank

$L_1, L_2, \dots, L_{n-1}$  =  $L$  ที่ Switching เข้าอยู่ก่อน

$L_n$  =  $L$  ที่จะ Switching เข้า

การต่อใน ungrounded bank จะติด current limiting reactor ไว้ที่ด้าน line แต่ grounded bank อาจต่อที่ ด้าน neutral คือใส่ไว้ในแต่ละ phase ก่อนต่อรวมกันเป็น neutral point แรงดันที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการนำ capacitor bank เข้าใช้งานหาได้จากสมการ

$$\Delta u/U \approx Q/S$$

$\Delta u$  = แรงดันที่เพิ่มขึ้น

$U$  = แรงดันก่อน energize

$Q$  = MVAR ของ capacitor bank

$S$  = short circuit MVA ตรงจุดที่ energize

ในทางปฏิบัติ การนำ bank เข้าใช้งานแต่ละครั้งแรงดันไม่ควรเปลี่ยนแปลงสูงเกิน 3 %

### 3.4.2 ค่า/ขนาดของ reactance มีผลต่อ resonant frequency

system impedance และ capacitance ของ c-bank ที่นำเข้าใช้งานในลักษณะขนานกับระบบอาจทำให้เกิด resonant frequency ที่ใกล้กับ harmonic ที่เกิดขึ้นจาก load

$$w_r = 1/(\sqrt{L_s \cdot C}) ; \quad h \cdot w_s = w_r ; \quad w_r = 2\pi f_r$$

$w_r$  = natural frequency (resonant frequency)

$w_s$  = system frequency : Hz

$h$  = harmonic order

$C$  = per phase bank capacitance : farad

$L_s$  = system inductance : henry

$h = w_r/w_s = \sqrt{(\text{short circuit level ที่จุดต่อเข้า} / \text{capacitor bank MVAR})}$

ในทางปฏิบัติ  $L_s$  จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับสภาพของ network คือ จำนวน line, และหม้อแปลงที่ต่ออยู่ในระบบ รวมถึงการเดินเครื่อง generator และรวมถึง load ที่ต่อเข้า จึงทำให้ resonant frequency ไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงได้

ทั่วไป capacitor bank ขนาดใหญ่จะมี reactor ต่อ series อยู่ อาจมีไว้เพื่อลดกระแส inrush หรือ มีวัตถุประสงค์ใช้เป็น harmonic filter หรือ de-tuned bank

การทำ harmonic filter จะปรับ tune : resonant frequency ของ bank ให้เท่ากับ frequency ที่ต้องการกรอง (ในทางปฏิบัติจะให้เกิด resonant frequency ต่ำกว่าต้องการเล็กน้อย)

การทำ de-tuned bank จะปรับให้มี resonant frequency ต่ำกว่า harmonic ต่ำสุดที่เกิดขึ้นในระบบ เพื่อให้ harmonic ต่างๆ เห็น impedance ของ bank เป็น inductance เช่น

harmonic ลำดับที่ต่ำที่สุดในระบบคือลำดับที่ 5 จะทำ de-tuned bank ต้องเลือก reactor ขนาด 6% ทำให้ bank มี resonant frequency ต่ำกว่า 5

$$X_L - X_C = 0$$

$$h \cdot X_L - X_C/h = 0$$

$$h = \sqrt{X_C/X_L} = \sqrt{100/6} = 4.08 < 5$$

การต่อ series reactor ขนาดที่สูงขึ้นเพื่อทำเป็น tuned หรือ de-tuned bank จะทำให้แรงดันคร่อม capacitor สูงขึ้น (จึงต้องระวัง unit voltage rating) และระบบจะได้ MVAR จาก bank มากขึ้น

#### 4. mechanically switched reactor

ประกอบด้วย shunt reactor ที่ใช้ circuit breaker เป็นอุปกรณ์ตัด-ต่อเข้ากับ transmission line, bus bar, หรือ transformer-tertiary terminal

reactor มีลักษณะเหมือนหม้อแปลงเพียงแต่ core จะมี air-gap

output ในช่วงแรงดันใช้งานจะมีความสัมพันธ์ของ U-I เป็น linear แต่ในขณะที่แรงดันสูงเกินไปมากๆ จะเกิด saturation ของ iron core: ทำให้ impedance ลดลง

reactor ไม่ sensitive กับ over voltage สามารถทนสภาพแรงดันเกินในช่วงเวลาหนึ่ง วัตถุประสงค์ในการใช้งาน

- เป็นอุปกรณ์ควบคุมแรงดันที่ปลายสายส่งยาวๆ หรือ cable
- เป็น compensation ให้ capacitance ของสายส่งยาวๆ หรือ cable
- ใช้เพื่อ control แรงดัน และ reactive power ของ underground cable

#### 5. SVC static var compensator

มีวัตถุประสงค์ในการใช้งาน

- ควบคุมแรงดันตรงจุดติดตั้งอย่างต่อเนื่อง
- เพิ่มการไหลของ active power ใน transmission line
- ลด temporary over voltage
- เพิ่ม transient stability
- damping power system oscillation
- ใช้ลดแรงดันกระพริบ flickering voltage

เนื่องจาก SVC สามารถแก้ปัญหาของระบบส่งกำลังไฟฟ้าได้หลายอย่าง ผู้ใช้จำเป็นต้องระบุสิ่งที่ต้องการหรือปัญหาที่ประสงค์จะใช้ SVC ช่วยเพื่อผู้ออกแบบจะได้ออกแบบที่เหมาะสม range ของ reactive power ที่ต้องการ

output ของ SVC สามารถกำหนดได้ดังนี้

- กำหนดค่า reactive power output ที่ rated line-line voltage เป็น  
inductive MVAR  
capacitive MAR
- ในช่วงของ inductive range จะเกิด maximum total reactive power output (inductive) ที่ maximum system voltage
- ในช่วงของ capacitive range จะเกิด minimum total reactive power output (capacitive) ที่ minimum system voltage

#### specification of SVC

SVC ทุกชนิดสามารถให้ reactive power ตามที่ต้องการได้ที่ nominal rating อย่างไรก็ตาม SVC แต่ละชนิดจะทำงานตามลักษณะเฉพาะที่ออกแบบไว้ ผู้ใช้งานจำเป็นต้องให้ข้อมูล

- nominal rating
- ความสามารถในการ over load (capability)
- การควบคุมและตอบสนองของระบบผิดไปจากกำหนด (control and dynamic performance)
- ระดับของ harmonics ทั้งก่อน (background) และขณะใช้ SVC

#### ข้อมูลบางอย่างที่ต้องคำนึงถึง

- การกำหนดค่า inductive power สูงมาก ( low reactance) ในช่วง inductive range จะมีผลทำให้ transient overload capability สูงขึ้น มี harmonic มีปริมาณสูงขึ้น ราคา reactor ถูกลง
- ถ้ากำหนด capacitive range ไม่กว้างนักจะทำให้ ราคา capacitor และหม้อแปลงลดลง