

บทที่ 5 Instrument transformer

Instrument transformer คืออุปกรณ์ที่ใช้แยกอุปกรณ์เครื่องมือวัดและ/หรืออุปกรณ์ควบคุมที่ต่ออยู่ด้าน secondary ออกจากด้านไฟแรงสูงที่ต่อเข้าทาง primary ของ Instrument transformer สามารถแยกออกเป็น

- อุปกรณ์ที่ใช้แยกอุปกรณ์วัดกระแส เรียกว่า current transformer
- อุปกรณ์ที่ใช้แยกอุปกรณ์วัดแรงดัน เรียกว่า voltage transformer

current transformer (CT)

CT ไม่เหมือน power transformer ทั้งหมดแต่ใช้หลักการ electromagnetic induction เหมือนกัน ลักษณะการใช้งานต่างกัน ใน power transformer กระแสไหลผ่านขดลวด primary จะมีความสัมพันธ์กับกระแสด้าน secondary ซึ่งเป็นไปตาม load แต่ CT มีขดลวด primary ต่ออนุกรม (series) กับ line เพื่อวัดกระแสที่ไหลผ่าน หรือกล่าวได้ว่า กระแสในขดลวด primary จะไม่ขึ้นกับ load ที่ต่ออยู่

อาจแบ่งประเภทของ CT ได้เป็นสองชนิดตามการใช้งาน

- CT ที่ใช้วัดกระแส โดยนำอุปกรณ์ instrument เช่น metering system ต่างๆ คือ energy meter, current indicating meter มาต่อเข้าที่ด้าน secondary เรียกว่า metering current transformer
- CT ที่ใช้กับระบบป้องกัน (protective equipment) เช่น trip coil, relay ซึ่งเรียกว่า protective current transformer

หน้าที่ของ CT

คือ แปลงกระแสสูงค่าหนึ่ง เป็นกระแสอีกค่าหนึ่งที่ต่ำลง ตามมาตรฐานกำหนด rated current ของขดลวด secondary ไว้ที่ 5A และ 1A เพื่อเป็นมาตรฐานในการผลิตอุปกรณ์ หรือเครื่องมือที่นำมาต่อเข้าที่ secondary terminal กรณีใช้งานกับไฟแรงสูง จำเป็นต้องมีฉนวนที่สามารถทนต่อแรงดันใช้งานและแรงดันผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นในระบบ แต่หากไม่คำนึงถึงฉนวน (insulation) สิ่งสำคัญของ CT ที่ต้องมี คือ

- primary winding
- magnetic core
- secondary winding
- burden

primary winding เป็นขดลวดที่ต่ออนุกรม (series) กับ line หรือ primary circuit แบ่งเป็นชนิด มีรอบเดียว single-turn primary winding ได้แก่ ring-type หรือ through-type ใช้ line

conductor/cable, หรือ busbar คล้องหรือสวมให้ผ่านช่อง (window) ของ core ที่มีขดลวด secondary พันอยู่จึงถือเป็นรอบเดียว และ ชนิดที่มีหลายรอบ multi-turn primary winding หรือ wound primary current transformer ขดลวดของ primary มีหนึ่งรอบจะดีกว่าหลายรอบ กล่าวคือ ผลต่อ แรงทางกลที่กระทำกับ conductor ของ primary ในขณะที่กระแสลัดวงจรไหลผ่าน และความร้อน ที่เกิดขึ้นจากกระแสสูง (dynamic and thermal stresses)

magnetic core เป็นแกนเหล็กที่ให้ induced flux ไหล คุณสมบัติของ CT ที่สำคัญคงเป็นเรื่องความละเอียดถูกต้องแม่นยำ และ ความเที่ยงตรง (accuracy) ของ CT คุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับ ชนิดของ material ที่ใช้ทำ core และโครงสร้างของ core จึงมักใช้ magnetic alloys

secondary winding เป็นขดลวดชุดที่สองที่พันบนแกนเพื่อลดกระแสให้ต่ำลง สามารถนำ อุปกรณ์ต่างๆ มาต่อเพื่อวัดค่าได้ คุณสมบัติของ CT ขึ้นอยู่กับ flux density ใน core เป็นสำคัญ flux ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับ impedance ทั้งหมดใน secondary circuit ส่วนหนึ่งคือ impedance ของขดลวด secondary บางกรณีจะมีค่ามากกว่า impedance ของอุปกรณ์ หรือ burden ที่ต่อเข้า

burden เป็น impedance ของอุปกรณ์ที่ต่อทาง secondary เช่น relay, เครื่องมือวัดหรือ อุปกรณ์อื่นๆ รวมทั้งสายที่ต่อระหว่างอุปกรณ์กับ secondary terminal รวมทั้งหมด คือ burden ของ CT อาจมีหน่วยเป็น VA หรือ ohm ก็ได้ เช่น

$$\begin{aligned} \text{CT ที่มี rated burden เท่ากับ} & \quad P \quad \text{VA} \\ \text{rated secondary current} & \quad I_s \quad \text{A} \\ Z_b : \text{burden} & = P / (I_s)^2 \text{ ohm} \end{aligned}$$

ถ้า burden มี power factor เท่ากับ $\cos\phi$

$$\text{ค่า resistance จะเท่ากับ} \quad R_b = Z_b \cdot \cos\phi$$

$$\text{ค่า reactance จะเท่ากับ} \quad X_b = Z_b \cdot \sin\phi$$

บางคนอาจมีความเข้าใจผิดคิดว่าซื้อ CT ที่มี burden สูงๆ ไว้ก่อน เมื่อเวลาใช้งานจะต่อ burden ที่มีค่าต่ำกว่า rated burden มาก แล้วจะทำให้ได้ accuracy ดีขึ้น error น้อยลง ความเข้าใจนี้ไม่ถูกต้อง ซึ่งจะกล่าวต่อไป

ค่ากำหนดต่างๆ ของ CT

- rated primary current
- rated secondary current
- rated burden
- supply frequency
- accuracy class

- system voltage ด้าน primary circuit
- rated short circuit current ที่ไหลผ่าน primary winding และระยะเวลาที่ไหลผ่าน

หลักการทำงานของ CT

ถ้ากระแส I_p ไหลผ่านทาง primary winding จะเกิด

- induced flux : ϕ ใน core
- flux ใน core จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันที่ secondary winding : E_s
- E_s เกิดขึ้นทำให้เกิดกระแส I_s ไหลใน secondary circuit
- กระแสที่ไหลเป็นไปตาม ampere-turn balance

$$N_p I_p = N_s I_s \text{ (เป็น ideal transformer)}$$

ในทางปฏิบัติ secondary winding จะมีทั้ง resistance และ leakage reactance และต้องคำนึงถึง capacitance ที่อาจมีค่าสูงจนมีผลต่อ impedance ของวงจร

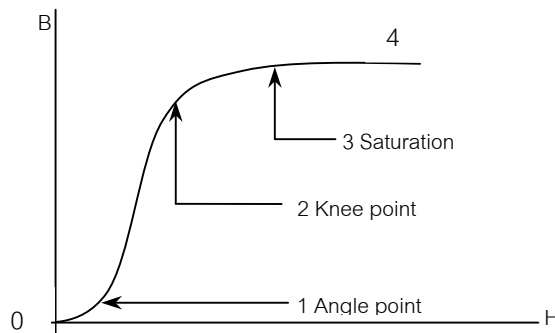
$$E_s = I_s Z_s = k \cdot \phi_m$$

$$\phi_m \text{ เป็น exciting ampere-turn : } N_p I_e$$

ฉะนั้น $N_p I_p$ จึงถูกแบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนของ primary exciting ampere-turn : $N_p I_e$ และ ส่วนของ primary transferring ampere-turn : $N_p I_{pl}$ เมื่อกระแสที่แปลงไปที่ด้าน secondary ไม่ใช้กระแสทั้งหมด จึงทำให้เกิด current error หรือ ratio error ขึ้น

โลหะที่ใช้ทำ core

โลหะที่ใช้ทำแกนเหล็ก (core) ต้องเป็น ferromagnetic material เนื่องจาก error เกิดขึ้นจาก magnetizing current ที่ใช้ในการสร้าง flux จึงจำเป็นต้องศึกษาเรื่อง magnetizing curve ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง flux density และ magnetizing ampere-turn หรือ B-H curve



จะเห็นได้ว่าเมื่อ flux density สูงขึ้น จะต้องใช้กระแสมากขึ้นในการสร้าง flux และเมื่อเลยจากจุด knee point กระแสจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วโดยที่ flux เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือเรียกว่า โลหะมีสภาพอิ่มตัว (saturation) ซึ่งทำให้มี error มากในการ transferring

จาก curve แสดงถึง oriented electrical steel ซึ่งความสัมพันธ์แบ่งได้เป็น 4 ช่วง

1. ช่วง 0-1 เป็นช่วงแรก origin ตอนเริ่มต้น ของ curve จนถึงจุดที่ 1 ที่เรียกว่า angle point ความสัมพันธ์ระหว่าง B-H ไม่ linear ช่วงนี้ flux และ exciting current ยังต่ำมาก
2. ช่วง 1-2 หลังจากจุดที่ 1 จนถึงจุดที่ 2 ที่เรียกว่า knee point ช่วงนี้ความสัมพันธ์เป็น linear เรียกว่าช่วง linear จุด knee point คือจุดที่ flux density เพิ่มขึ้น 10% ขณะที่กระแสเพิ่มขึ้น 50 %
3. ช่วง 2-3 หลังจากจุดที่ 2 จนถึง จุดที่ 3 เรียกจุดนี้ว่าจุดอิ่มตัว saturation ช่วงนี้ flux density เปลี่ยนเพิ่มขึ้นน้อยมาก แต่ต้องการกระแสมาก
4. ช่วงหลังจากช่วงอิ่มตัว saturation ไปแล้ว ช่วงนี้ flux density แทบไม่เปลี่ยนแปลง แต่ต้องการกระแสมาก เรียกว่าช่วง saturation

protective current transformer สามารถใช้ช่วง 0-3 ในขณะที่มีกระแสปกติ แต่ขณะมีกระแสลัดวงจรไหลผ่านอาจอยู่ช่วงต้นๆ ของ 4 แต่ metering current transformer จะใช้ช่วง 0-1 เท่านั้น ในทางปฏิบัติอาจใช้ถึงช่วงก่อน knee point ขณะที่ full load current ไหลผ่านขดลวด primary เพราะจะใช้ core material น้อยลง

material ส่วนใหญ่ที่ใช้คือ

- hot rolled silicon-iron alloy
- cold rolled oriented silicon-iron alloy (electrical steel)
- nickel-iron alloy
- composite material

hot rolled silicon-iron alloy

ในยุคแรกๆ material ที่ใช้ทำแกนเหล็กมีส่วนผสมของ mild steel กับ carbon ปริมาณเล็กน้อย มีข้อเสียคือ ageing เร็ว หรือมีอายุการใช้งานสั้น คือช่วงใช้งานจะมี hysteresis loss สูงขึ้นเรื่อยๆ ต่อมามีการพัฒนาใช้ silicon ผสมแทน carbon ทำให้ปัญหาเรื่อง ageing หดไป แต่ถ้าใส่ silicon มากจะเปราะ และหักง่าย ไม่สะดวกเวลาตัดและเจาะรู ปัจจุบันมี hot rolled electrical steel ที่มี silicon ผสมน้อยลงมีคุณสมบัติของ permeability ดีขึ้น จึงนิยมใช้ทำหม้อแปลง ทำให้มีชื่อเรียกว่า transformer grade

cold rolled oriented silicon-iron alloy (electrical steel)

ต่อมามีการพัฒนาการผลิตเหล็กมากขึ้นสามารถใช้วิธี cold rolled ทำให้สามารถปรับปรุง magnetic property ได้ดีขึ้นทำให้เกิดการเรียงตัวกันของ crystal structure ดีขึ้นในทิศทางที่รัด ทำให้ flux ที่ไหลในแนวขนานกับผิวของแผ่นเหล็ก (laminated sheet) ได้ค่า permeability ดีขึ้นมาก

ลด losses ทำให้ CT มีขนาดลดลง แต่ flux ที่ไหลในทิศทางที่หักโค้งจะน้อยกว่าแนวขนาน ฉะนั้น การทำ core sheet เป็นรูปตัว T หรือตัว U จะดีกว่าการทำเป็น strip wound core และเป็นรูป ring-type core

nickel-iron alloy

เป็นโลหะที่มี losses ต่ำ แต่มี permeability สูง มีข้อเสียคือ คุณสมบัติ magnetic performance จะเปลี่ยนแปลงถ้าได้รับ mechanical stress ส่วนใหญ่ เป็น c-core จะ ประกอบ และ bonded ก่อนแล้วจึงตัดเป็นแบ่งเป็นรูป C ฉะนั้นจำเป็นต้องป้องกันเวลาขนย้าย และประกอบ อย่างดี การผลิต alloy ชนิดนี้มีราคาแพง จึงใช้เฉพาะ CT ที่ต้องการ accuracy สูงเท่านั้น

composite material

ใช้ผสมกันระหว่าง nickel-iron alloy กับ electrical steel ข้อดี คือ สามารถใส่ nickel-iron alloy ไว้ตรงกลางระหว่าง electrical steel ทำให้มี mechanical reinforce

การบอกลักษณะของ CT

- ratio คืออัตราส่วนของการแปลงกระแส จากกระแสด้าน primary เป็นกระแสด้าน secondary เช่น ratio ของ current transformer 300 : 5 มีความหมายว่า CT มี rated primary current เท่ากับ 300 A และ rated secondary current มีค่า 5 A หรือ CT ที่เป็น multi-ratio : 100-1200 A. สามารถเลือกกระแสใช้ได้ 10 ratio ตั้งแต่ 100 A. ถึง 1200 A. โดยที่กระแสด้าน secondary มีค่าคงที่เท่ากับ 5 A. และกรณีที่มี secondary หลายชุดพันบนแต่ละ core ให้เลือกใช้งาน เรียกว่า multi-core เช่น 100-1200//5
- current rating factor : RF คือ ค่าจำนวนเท่าของกระแสด้าน primary ที่ CT สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเช่น 1 , 1.3 , 2 เป็นต้น
- ความแม่นยำ (accuracy) คือความถูกต้องแม่นยำของการแปลงกระแส ซึ่งมีลักษณะต่างกันระหว่าง ชนิด protection และ metering
- polarity ใช้ในกรณีที่น่า secondary ของ CT สองชุด หรือมากกว่าสองชุดมาต่อกัน และทิศทางการไหลของกระแส

ข้อกำหนดของความแม่นยำของ CT (accuracy class)

IEEE/ANSI std.

metering CT มีข้อมูลกำกับที่กำหนดไว้ดังนี้

- มี accuracy class ที่ระบุคือ 0.3 , 0.5 , 0.6 , 1.2

- มี rate burden อยู่ 5 แบบ คือ B - 0.1 , B - 0.2 , B - 0.5, B - 0.9 และ B - 1.8
เช่น 0.3 B - 0.1 คือ CT ตัวนี้มี accuracy class ± 0.3 % และมี rated burden เท่ากับ 0.1 Ω

relaying CT มีข้อมูลกำกับที่กำหนดไว้ดังนี้

- C classification เป็นการบอก accuracy ที่ระบุได้จากการคำนวณ
- T classification เป็นการบอก accuracy ที่ระบุได้จากการทดสอบ (test)
- secondary terminal voltage rating เช่น กรณีพิกัดด้าน secondary ของ CT = 5 A

secondary terminal voltage standard burden	Ω
10	B - 0.1
20	B - 0.2
50	B - 0.5
100	B - 1
200	B - 2
400	B - 4
800	B - 8

standard burdens for current transformer ที่กำหนดเป็นมาตรฐานมีลักษณะดังนี้

burden	resistance (Ω)	inductance (mH)	impedance (Ω)	volt-ampere (at 5 A)	power factor
<u>metering burdens</u>					
B - 0.1	0.09	0.116	0.1	2.5	0.9
B - 0.2	0.18	0.232	0.2	5.0	0.9
B - 0.5	0.45	0.580	0.5	12.5	0.9
B - 0.9	0.81	1.04	0.9	22.5	0.9
B - 1.8	1.62	2.08	1.8	45.0	0.9
<u>relaying burdens</u>					
B - 1	0.5	2.3	1.0	25	0.5
B - 2	1.0	4.6	2.0	50	0.5
B - 4	2.0	9.2	4.0	100	0.5
B - 8	4.0	18.4	8.0	200	0.5

standard accuracy classes and limits of TCF for current transformer for metering service

TCF = transformer correction factor

accuracy class	limit of TCF				limit of P.F (lagging of metered power load)
	100% rated current		10% rated current		
	min	max	min	max	
1.2	0.988	1.012	0.976	1.024	0.6 – 1.0
0.6	0.994	1.006	0.988	1.012	0.6 – 1.0
0.5	0.995	1.005	0.995	1.005	0.6 – 1.0
0.3	0.997	1.003	0.994	0.006	0.6 – 1.0

เช่น C 100 ความหมายคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านด้าน primary เท่ากับ 20 เท่าของ rated current ในขณะที่มี rated burden 1 Ω ต่อยู่ด้าน secondary จะเกิดแรงดันที่ secondary terminal เท่ากับ 100 โวลต์ (rated burden x (20x5) =secondary volt) และมี ratio error จากการคำนวณไม่เกิน 10%

IEC Standard (International Electrotechnical Commission)

metering (metering core)

- F_s = instrument security factor คือจำนวนเท่าของ rated current ที่ทำให้ core เกิดอิ่มตัว

- accuracy กำหนดค่าเท่ากับ 0.1 0.2 0.5 1.0 3.0

relaying (protective core)

- ALF :accuracy limit factor คือค่าจำนวนเท่าของกระแสที่ ratio error ไม่เกิน มาตรฐาน

- class มี 5P, 10P

เช่น ALF = 20, I_n = 5 A. class 5P

ความหมายคือ ที่ $20 \times 5 = 100$ A, % ratio error ไม่เกิน 5.0%

- continuous-thermal-current rating factor ที่ ambient temperature เท่ากับ 30°C

ค่า rating factor นี้กำหนดไว้ 6 ค่า คือ 1.0 , 1.33 , 1.5 , 2.0 , 3.0 และ 4.0

- short-time current rating คือค่ากระแสสูงสุดที่มีผลด้านแรงทางกล และความร้อน

- mechanical current rating (I_{dyn}) คือ ค่ากระแส short circuit สูงสุดที่ไหลผ่านขดลวด โดยขดลวดสามารถทนแรงกล (mechanical force) ที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งกำหนดเป็นค่า RMS ของ AC component ของรูปคลื่น asymmetrical primary current เมื่อเกิดลัดวงจร

ทางด้าน primary circuit

- short-time thermal current rating (I_{th}) คือ ค่ากระแส short circuit สูงสุดที่ไหลผ่านขดลวดด้าน primary โดยที่ขดลวดสามารถทนความร้อนที่เกิดขึ้น โดยมีอุณหภูมิไม่เกินจากค่าที่กำหนด ซึ่งกำหนดค่าเป็น RMS ของ symmetrical primary current
อุณหภูมิที่ CT สามารถทนได้ตามชนิดของฉนวนคือ กรณีฉนวนชนิด temperature rise 55 °C มีอุณหภูมิไม่เกิน 250 °C และ กรณีชนิด 80 °C มีอุณหภูมิไม่เกิน 350 °C ใช้เวลาทดสอบนาน 1 วินาที

การเลือก primary rated current

ต้องคำนึงถึงขณะที่กระแสมีปริมาณต่ำๆ minimum current ที่ไหลผ่านขณะใช้งานด้วย เพราะ primary ampere-turn จะมีผลต่อคุณสมบัติเรื่อง ratio error และ phase error

อีกประการหนึ่งเรื่องของ dynamic force และ thermal stress ที่เกิดขึ้นในขณะที่มีกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นไหลผ่าน ด้าน primary winding

ถ้ามี primary winding หนึ่งรอบ หรือเป็น bar-type จะมีราคาถูกกว่าชนิดหลายรอบ wound-type primary winding

บางกรณีอาจมีความจำเป็นต้องใช้ชนิด multi-ratio ซึ่งทำได้โดย

- ให้รอบด้าน secondary คงที่ไว้และต่อรอบด้าน primary ให้ขนาน หรืออนุกรมกัน
- ให้รอบ primary คงที่ไว้แล้วใช้วิธี tap รอบ ออกมาตามต้องการ หรือต่อขนาน หรืออนุกรม ด้าน secondary
- ออกแบบโดยใช้สองวิธีรวมกัน

การเลือก secondary rated current

ในปัจจุบัน secondary current rating มีอยู่ 2 ชนิด คือ 1 A. และ 5 A. อาจมีข้อคำถามว่าจะเลือกชนิดไหนมาใช้งานดี

ลองพิจารณา CT สองตัวที่มี กระแส 5 A. และ 1 A.

ถ้ามี flux density เท่ากัน มีค่า rated primary current เท่ากัน มีขนาด core ที่กำหนดเท่ากัน และ secondary ampere-turn มี mean length เท่ากัน ขณะที่ทดสอบกับ rated burden ที่ primary rated current จะมีค่า error เท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติ สายที่ใช้ต่อระหว่าง terminal กับ burden หรือ relay มีความยาวมาก ทำให้มี lead resistance ไม่เท่ากัน จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญ ถ้า lead ที่ใช้ต่อมีขนาดเดียวกันจะพบว่าชนิด 1 A. มี burden (VA) น้อยกว่า 5 A. ถึง 1/25

อีกประการหนึ่งชนิด 1 A. สามารถปรับค่า error ได้ง่ายกว่า โดยปรับรอบด้าน secondary

เพื่อชดเชยกับ primary ampere-turn : $N_p I_p = N_s I_s$ เช่นปรับรอบ 1 รอบของ CT 100 : 5 จะส่งผลถึง 5% แต่มีผลกับ CT 100/1 เพียง 1%

ชนิด 1 A มีข้อดีเรื่องราคาคือ ราคาจะแพงกว่าชนิด 5 A. แต่ผู้ผลิตอาจจะปรับขนาดของ core ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อลดค่า material เนื่องจาก burden น้อยกว่า 5 A.

ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของชนิด 1 A. คือ จะเกิดแรงดันสูงกว่า 5 A. ขณะเกิด open circuit ที่ secondary เนื่องจากมีจำนวนรอบของขด secondary มากกว่า

สรุปไม่มีข้อกำหนดตายตัวว่าชนิดไหนดีกว่า แต่สามารถกล่าวได้ว่า ควรเลือกขนาด 5 A. ก่อน ยกเว้นว่าจะมีความจำเป็นบางประการ เช่นระบบทั้งหมดถูกออกแบบไว้เป็นชนิด 1 A. มีปัญหาเรื่อง spare unit หรือ ระยะทางระหว่าง CT กับ อุปกรณ์ป้องกันอยู่ห่างกันมาก เป็นต้น

การเลือก secondary rated burden

การพิจารณาหา rated burden ต้องคำนึงถึงสาย lead ที่ใช้ต่อระหว่าง CT กับอุปกรณ์ต่างๆ standard burden มีค่าตามมาตรฐานกำหนดไว้ดังกล่าวมาแล้ว เวลาใช้งาน burden อาจมี power factor ไม่เหมือนกับมาตรฐานที่กำหนดไว้ทำให้มี error เกิดขึ้นไม่เหมือนกับตอนที่ทดสอบอีกประการหนึ่งปกติค่า error ที่ burden ต่ำๆ มักจะเป็นด้านบวก (positive) มากกว่า เมื่อเพิ่ม burden มากขึ้นจนถึง rated burden ค่า error จะลดลงและไปอยู่ด้านลบ (negative) ถ้าเลือกใช้ CT ที่มี rated burden สูงเกินไปมาใช้งานเวลาที่นำ burden ที่ต่ำกว่ามาต่ออาจทำให้ error อยู่ด้านเป็น positive ซึ่งอาจมีค่าสูงกว่าด้าน negative และจะมีผลมากถ้าการออกแบบใช้ turn correction ปรับ error เพื่อให้ขณะที่มี rated burden มี error ไม่ให้เกินค่ากำหนด การเพิ่ม turn ทำให้ error เป็น positive มากขึ้น

การใช้งาน overload

ปกติ CT จะสามารถใช้งานในสภาพ overload 120% ได้นานระยะเวลาหนึ่ง โดยมีข้อจำกัดที่ต้องคำนึงถึงคือ temperature rise ของขดลวดและน้ำมัน นอกจากนี้ CT จะกำหนด current factor ไว้เพื่อให้สามารถใช้อย่างต่อเนื่องโดยการออกแบบ current density และ temperature rise ไว้ให้เหมาะสม อย่างไรก็ตาม accuracy ที่ออกแบบไว้อาจจะดีที่สุดที่ current factor สูงสุดแต่นำไปใช้งานที่ 100% อาจจะมี accuracy ต่ำลง และที่กระแสต่ำอาจไม่เหมาะสม ฉะนั้นควรเลือก rated primary current เท่ากับกระแสที่ไหลผ่านจริง หรือเลือกจากค่ามาตรฐานที่สูงกว่าแต่ให้อยู่ใกล้กับค่าใช้งานจริงมากที่สุด

เช่น ถ้าใช้กับกระแส load เท่ากับ 500 A. ให้เลือก rated primary current เท่ากับ 500 A. หรือ 600 A. ตามมาตรฐาน ซึ่งจะดีกว่าเลือกขนาด 400 A. และกำหนด current factor 1.25 เท่า

การทดสอบ CT ที่มีสภาพ overload เช่นที่ 120% จะมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบ error ของ accuracy แต่ไม่มีวัตถุประสงค์เรื่องการพิจารณาความสามารถใช้ continuous loading ที่ 120 %

สิ่งแตกต่างกันระหว่าง protective และ metering current transformer

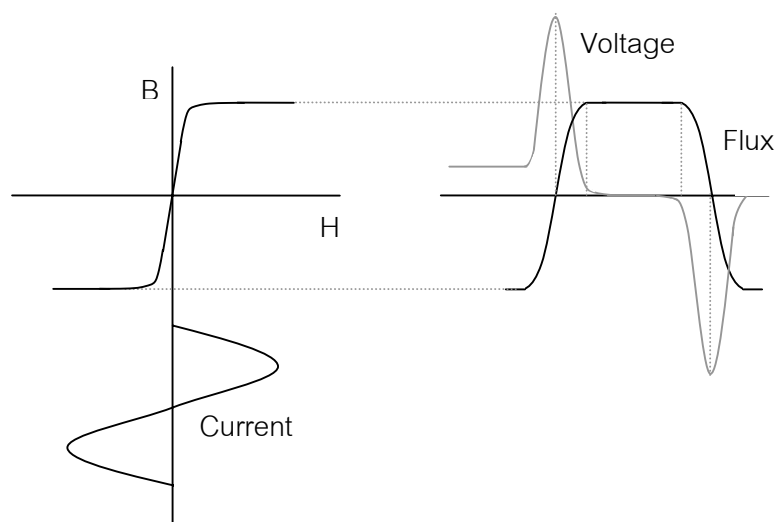
มีลักษณะบางประการที่แตกต่างกัน

- protective CT จะคำนึงถึงเฉพาะ ratio error ส่วน phase error ไม่ค่อยสำคัญ เหมือน metering CT ยกเว้นกรณีที่มีการนำไปเปรียบเทียบ phase กันระหว่าง CT สองตัว
- จะพิจารณา error ของ metering CT เฉพาะในกรณีที่ primary current มีปริมาณ 5-120 % ของ rated current แต่ protective CT ต้องคำนึงถึงกระแสที่ระดับหลายเท่าของ rated current ที่เกิดขึ้นขณะวงจรด้าน primary circuit เกิดลัดวงจร การใช้ protective CT กับ differential relay จำเป็นต้องคำนึงถึง exciting curve ของ CT ทั้งสองตัว หรือ มากกว่าสองตัวที่นำมาต่อกัน หากมีความแตกต่างกันมาก จะทำให้ minimum setting หรือ mismatch setting (ที่คำนึงถึง tap changer compensation) ไม่เพียงพอ กรณี bus differential relay มีคุณลักษณะเป็น high impedance relay ค่าแรงดันที่เกิดจากกระแส mismatch คูณกับ relay impedance ต้องน้อยกว่า voltage setting ของ relay

open circuit voltage ใน CT

ในขณะที่มี burden ต่ออยู่ที่ secondary circuit ของ CT จะมีแรงดันคร่อม burden เพียงเล็กน้อยเป็นระดับ volts แต่เมื่อ secondary circuit เกิด open หรือ กรณีที่ปลดสายต่อของ burden ออกขณะกำลังใช้งาน เมื่อมีกระแสไหลทาง primary จะทำให้เกิดไฟแรงสูงที่มีรูปร่างเป็น pulse ที่มี peak สูงอาจเป็นระดับ kilovolt ที่ secondary winding

CT ที่มี rated secondary current 5 A. มี burden ขนาด 15 VA ต่ออยู่ ขณะที่กระแสไหลทาง primary เป็น rated current จะมีแรงดันที่ secondary terminal ประมาณ 3 volts แต่ถ้า secondary circuit เกิด open จะเกิดแรงดันที่มี peak สูงเป็นระดับ kV เพราะ primary ampere-turn ทั้งหมดจะเป็น exciting ampere-turn ไม่มี ampere-turn ในส่วนของ transferring จึงทำให้ core เกิด saturation อย่างมาก



ตามรูป แสดงรูปร่างของ flux ที่มี flat-topped shape

แรงดันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของ flux จึงทำให้ขณะที่ flux เปลี่ยนแปลงเป็นรูป flat โดยเร็วก็จะเกิด เป็นแรงดันสูงเฉพาะตรงนั้น (peaky) แรงดันสูงนี้อาจทำให้ฉนวนด้าน secondary เสียหาย (breakdown) และอาจเกิด overheat จาก eddy current losses ได้ด้วย ในทางปฏิบัติจึงต้องออกแบบให้มีฉนวนที่ทนแรงดันที่เกิดขึ้นนี้ตลอดเวลาถึงแม้ว่า routine test จะกำหนดให้ทดสอบเพียง 1 นาที

voltage transformer

voltage transformer คือ instrument transformer ที่ใช้แปลงแรงดันให้ต่ำลง และมักจะมีค่าแรงดัน ตามมาตรฐานกำหนด เช่น 100, $100/\sqrt{3}$, 115, $115/\sqrt{3}$, 220, $220/\sqrt{3}$, volts เป็นต้น

ข้อกำหนดลักษณะของ voltage transformer คือ

- rated primary voltage
- rated secondary voltage
- insulation level
- rated burden
- frequency
- จำนวน phases
- accuracy class

ที่มีใช้งานแบ่งเป็นสองชนิด

- magnetic-type voltage transformer (MVT)
- capacitive voltage transformer (CVT)

magnetic-type MVT จะใช้งานที่แรงดันเดียว หรือ ที่ flux density เดียว ไม่มีลักษณะเป็น wide range เหมือน CT การออกแบบเพื่อแปลงแรงดัน ใช้หลักการเช่นเดียวกับ power transformer สิ่งที่แตกต่างกัน คือ ต้องคำนึงถึง error ของแรงดันที่แปลงออกที่ด้าน secondary

$$V_p I_p = V_s I_s \quad \text{และ} \quad N_p I_p = N_s I_s$$

capacitive voltage transformer มีลักษณะเป็น capacitive divider คือมี capacitor สองชุดต่ออนุกรมกัน ส่วนล่างจะมีค่า capacitance สูงกว่าส่วนบน แรงดันที่ tap ออกจาก capacitor ส่วนล่างจะนำไปต่อเข้ากับ intermediate voltage transformer (IVT) ที่เป็น inductive-type เพื่อแปลงแรงดันให้ต่ำลงในระดับเหมาะสมกับอุปกรณ์

เนื่องจาก capacitor impedance และ leakage impedance ของ IVT ทำให้การใช้งานไม่สามารถควบคุม ratio ที่ burden ค่าต่างๆ ได้ จึงจำเป็นต้องมี tuning reactor ซึ่งจะต่อขึ้นไว้ก่อนต่อเข้า inductive voltage transformer เมื่อเลือกค่าที่เหมาะสมกับ frequency ระบบ ก็จะทำให้ impedance ของ capacitor หดไป

accuracy class ของ instrument transformer

IEC standard

- class สำหรับ metering : 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 3.0
 - class สำหรับ relaying : 3P, 6P ที่ burden 25-100%
- การใช้งานในช่วงแรงดัน 5 % ถึง แรงดันที่ออกแบบให้เหมาะกับการ ground ของระบบแต่ละประเภท : มีค่าเท่ากับ $V_r \cdot f$ %
- ระบบที่เป็น solidly ground $f = 1.5$
- ระบบที่ไม่เป็น solidly ground $f = 1.9$

ตารางแสดงค่า standard accuracy classes and limits of TCF for voltage transformer

accuracy class	limits of transformer correction factor		limits of power factor (lagging)	
	Min	Max	Min	Max
1.2	0.988	1.012	0.6	1.0
0.6	0.994	1.006	0.6	1.0
0.3	0.997	1.003	0.6	1.0

ตารางแสดงค่า standard burdens for voltage transformer

Designation of Burden	Secondary VA	Burden Power Factor
W	12.5	0.10
X	25	0.70
Y	75	0.85
Z	200	0.85
ZZ	400	0.85

การเกิด ferro-resonance และวิธี suppression ใน CVT

ferro-resonance เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในวงจรที่ประกอบด้วย capacitance ต่ออนุกรมกับ inductance ที่มีลักษณะคุณสมบัติเป็น non-linear เช่น exciting inductance ของ inductive voltage transformer หรือ exciting inductance ของ intermediate voltage transformer ในขณะที่เกิดจะพบว่ามีการ oscillation ที่ sub harmonic frequency

เหตุการณ์ที่ทำให้ CVT เกิด ferro-resonance

เนื่องจากคุณสมบัติของ capacitor จะเปลี่ยนแปลงแรงดันทันทีทันใดไม่ได้ และ inductor จะเปลี่ยนแปลงกระแสทันทีทันใดไม่ได้ ฉะนั้นเหตุการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลง แรงดัน หรือ กระแส ของ CVT อย่างรวดเร็วจะทำให้วงจรไม่ stable จะเกิด oscillation เพื่อปรับตัวให้เข้าสู่สภาวะปกติ (steady state) เหตุการณ์ดังกล่าวได้แก่

- 1) เกิด fault ในสายส่ง ระบบป้องกันทำงานสั่งปลดสายส่งออก แล้วสั่ง reclose กลับเข้าอย่างรวดเร็ว ผลหลังจากการ reclose อย่างรวดเร็ว คือ แรงดันที่ค้างอยู่บนสายส่งเนื่องจาก capacitance (trap charge) ไม่เท่ากับแรงดันระบบขณะที่ reclose กลับเข้ามา ทำให้เหมือนกับมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างรวดเร็วที่ C_1+C_2
 - 2) ปลด burden ขนาดใหญ่ออกจาก secondary circuit มีผลต่อ voltage drop ครอบคลุม (C_1+C_2) หรือ trap charge ทำให้แรงดันที่ C_1 และ C_2 เกิดเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว
 - 3) เกิด short circuit ในวงจรด้าน secondary circuit แล้ว fuse ขาด จะมีผลเช่นเดียวกับข้อ 2 แต่รุนแรงกว่ามาก เนื่องจากกระแส short circuit จะสูงกว่ากระแส load
 - 4) ในกรณีที่โครงสร้างของ CVT มี gap ครอบคลุม C_2 หากเกิด flashover ที่ gap ครอบคลุม C_2 เมื่อ flashover หายไป จะเกิด oscillation ได้ เนื่องจาก C_1 และ C_2 ต้องปรับสภาพกลับมาเป็น voltage divider อีกครั้งหลัง flashover หายไป
- ทั้ง 4 เหตุการณ์ เหตุการณ์ที่ 3 จะเกิด oscillation ที่มี energy มาก และรุนแรงที่สุด จึงใช้เป็นเหตุการณ์ที่จะทดสอบวงจร ferro resonance suppression

วิธี suppression ferro-resonance

มีวิธี suppression หลายวิธี แต่ทั้งหมดใช้หลักการ damp energy ที่เก็บอยู่ที่ตัว capacitor ด้วย resistor สิ่งที่แตกต่างกันในแต่ละวิธี คือ การออกแบบวงจร เช่น

- ใส่ fixed resistor ต่อครอบคลุม secondary circuit ไว้
 - ข้อดี - ง่ายและไม่ยุ่งยาก, สามารถ damp high frequency ได้ด้วย
 - ข้อเสีย - ต้องออกแบบให้ CVT มี burden ที่สูงขึ้นมา ทำให้มีโครงสร้างใหญ่
 - เกิด heat เนื่องจาก loss ตลอดเวลาทำให้เกิดความร้อน
- ใส่ resistor ที่มี saturable reactor ทำหน้าที่ switching ให้ resistor เข้าและออกในวงจร

secondary circuit เพื่อแก้ปัญหาข้อเสียของวิธีที่ 1

- ใส่ resistor ที่มีอุปกรณ์ electronic ไว้ switching เช่น FDD (fast damping device) ซึ่ง
จะแบ่ง resistor ออกเป็น step การนำ resistor เข้าในวงจรเมื่อแรงดันถึงจุดกำหนด จะ
พร้อมกัน ส่วนการนำออกเมื่อแรงดันกลับสู่ระดับที่ตั้งไว้ จะทยอยปลด resistor ออกไม่
พร้อมกัน เพราะหากปลด resistor ออกพร้อมกัน อาจเกิด oscillation ขึ้นใหม่อีกครั้ง

ตามมาตรฐาน IEEE/ANSI ตามหัวข้อ Type Test กำหนดให้ทดสอบ CVT เพื่อแสดงว่ามี
ความสามารถ suppress ferro-resonance ได้ในขณะที่ไม่มี burden ต่ออยู่ หรือมีเพียง burden
ของ measuring device ที่ต่อเพื่อวัด oscillation เท่านั้น โดยใช้เหตุการณ์ของการเกิดลัดวงจรด้าน
secondary circuit เป็น trigger

ปกติการออกแบบ flux density ที่แรงดันใช้งานของ intermediated voltage transformer
มีค่าต่ำ จึงต้องระวังในการนำ auxiliary transformer มาต่อในวงจรด้าน secondary เพราะ
auxiliary transformer ที่ไปมีการออกแบบ flux density ที่แรงดันใช้งานสูงมาก จะเกิด ferro-
resonance กับ capacitance ได้งานกว่า intermediated voltage transformer เพื่อป้องกันไม่ให้
เกิดกับ auxiliary transformer จึงควรใช้รุ่นที่มี flux density ต่ำมาก เช่นมี rated flux density
ประมาณ 0.3 tesla

จากประสบการณ์สาเหตุของ ferro-resonance เกิดขึ้นเพราะมี auxiliary transformer ต่อ
อยู่ในวงจรเสมอ เพื่อนำไปใช้ในวงจร synchronizing, indicating lamp หรือใช้ปรับแรงดันให้เป็น
standard voltage เป็นต้น

ข้อควรระวังในการใช้ magnetic voltage transformer ในระบบแรงดัน 115-500 kV.

การใช้ MVT ต่อกับ line, transformer หรือ bus ในระดับแรงดัน 115-500 kV มี ข้อควร
ระวัง คือ อาจเกิด ferro-resonance เนื่องจาก วงจรที่เกิดขึ้นหลังจาก de-energize แล้ว อาจเกิด
วงจรสภาพ capacitance ต่อกับ non-linear inductance ได้ จะมีแรงดันที่เกิดจาก capacitance
coupling จาก line ที่ขนาน และยังใช้งานอยู่กับ non linear exciting induction ของ voltage
transformer ของ line ต่อ series กัน เช่น

กรณีใช้เป็น line voltage transformer :

- เกิดวงจร grading capacitance ของ breaker ที่ de-energize ต่อ series กับ non
linear exciting induction ของ line voltage transformer
- เกิดวงจร coupling capacitance ระหว่าง line ที่เดินขนานและใช้งานอยู่ (energize)
กับ line ที่ปลดออก (de-energize) ต่อ series กับ non-linear exciting induction
ของ voltage transformer ที่ต่อใช้ใน line ที่ปลดออก

กรณีใช้เป็น bus voltage transformer :

- เกิดวงจร grading capacitance ของ breaker ต่อ series กับ non linear exciting induction ของ voltage transformer ที่ใช้กับ bus ที่ปลดออก กรณีนี้เกิดขึ้นจาก bus differential relay ทำงานสั่งปลด breaker ทุกตัวที่ติด bus นั้นออก

การแก้ไข ferro-resonance ที่เกิดขึ้นกับ MVT โดยการใช้ damping resistor ต้องคำนึงถึง

- การให้ข้อมูลแก่ผู้ผลิตเพื่อออกแบบ flux density ของ voltage transformer ให้เหมาะสมกับการใช้ resistive damping เพราะค่า damping resistance ขึ้นกับ over-exciting factor ของ magnetic core
- การต่อ damping resistor ในวงจร secondary ของ voltage transformer ที่ใช้กับ energy meter ไม่ควรเป็นชนิดต่อเป็น fixed burden เพราะมีผลกับ accuracy
- อาจจำเป็นต้องการ tertiary winding เพื่อต่อ damping resistor
- ใช้ ferro-resonance detector เช่น under frequency relay หรือ auxiliary contact ของ breakers ซึ่งมี reliability ต่างกัน
- การต่อ damping resistor เข้าในวงจรหลังจากที่ breaker open แล้ว ควรจะเป็นช่วงเวลาสั้นๆ ไม่ควรต่ออยู่จนกว่า breaker จะ close กลับเข้าใช้งาน

นอกจากคำนึงถึงการเกิด ferro-resonance แล้ว ยังต้องคำนึงถึงการใช้งานที่ต่อกับ high voltage cable ที่ยาวมากๆ เนื่องจาก inductive voltage transformer ต้องเป็นตัวรับการ discharge ประจุของ cable capacitance