เล่าเท่าที่รู้...
การหาขนาดกระแสลัดวงจรด้านแรงต่ำ

อ่านหนังสือเรียนมาเล่าเท่าที่รู้**การหาขนาดกระแสลัดวงจรด้านแรงต่ำ**... เรื่องไม่ได้มีปัญหาอะไรที่ต้องแก้ไขหรือปรับปรุงใดๆ แต่ผู้เขียนมีความเห็นว่า เรื่องนี้มีการพูดถึงทุกครั้งที่จะเขียนลงไปในแบบของคนออกแบบหรือเมื่อเวลาจะสั่งซื้อเซอร์กิตเบรคเกอร์ของผู้รับเหมา บางครั้งในทำนองที่ว่าหากขนาดของค่า IC ลดลงจากนี้สัก 4 หรือ 5 kA ก็ดีน่ะซิจะได้สามารถเลือกรุ่นนี้ได้ หรือชักจะสงสัยว่าค่า kA ที่เขียนไว้ในแบบนั้นเป็นค่าที่เกินไปมากหรือไม่ ก็เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่บ้านเราใช้งานกันอยู่นี้ บ้านเรายังผลิตเองครบกระบวนการไม่ได้สักรุ่น เลยทำให้นึกว่าจะไปซื้อรุ่นที่มีค่า kA สูงๆ ไปทำไมให้ต้องสูญเสียเงินตราไปต่างประเทศ หรืออาจจะมีคำถามอื่นๆ อีกมากมาย รวมทั้งคำถามที่ผมเคยถามตัวเองเมื่อนานมาแล้วว่า อะไรกันนะที่พูดกันว่าค่ากระแสลัดวงจรที่ infinite bus บางทีก็ได้ยินว่า ค่ากระแสลัดวงจรที่ 250 MVA บ้าง 350 MVA บ้าง หรือบ้างก็ที่ 500 MVA แล้วก็ยังบอกว่า ค่า MVA นี้มาจากการไฟฟ้าฯตอนนั้นรู้สึกว่า เห็นทีอาชีพวิศวกรไฟฟ้าคงห่างไกลความเป็นตัวเรามากเหลือเกินกว่าตอนที่จบมาใหม่ๆ ว่า ความรู้มีเต็มเปี่ยมดูจะออกแนวร้อนวิชาด้วยซ้ำไป เอาเข้าจริงความรู้มีเพียงศัพท์แสงที่ซับซ้อนเมื่อต้องการจะสื่อสาร โดยการพูดเรื่องยากซะยากจนเราเองยังรู้สึกว่ายากเลย ส่วนเรื่องง่ายก็พูดซะยากไปด้วย เลยนึกแล้วละอายใจอยู่ไม่น้อย นานาความที่อยากรู้เรื่องนี้เป็นจริงเป็นจังจึงได้เวลาคุ้ยกองหนังสือหาหนังสือคงต้องเริ่มที่หนังสือเรียนน่าจะมีให้ได้อ่านกันบ้างโชคเป็นของผมครับได้มาเล่มหนึ่งตรงเป๊ะเลย ชื่อหนังสือ**การออกแบบไฟฟ้า - กรุงเทพฯ : ทีซีจี พริ้นติ้ง**, 2545 ผู้เขียนคือ **อาจารย์ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์** หนังสือนี้มีดรรชนี 621.3192 เลขอ้างอิง ISBN 974-9940-01-6 เล่มที่ผมใช้ประกอบการเขียนบทความนี้เป็นเล่มที่พิมพ์ครั้งที่ 2 ปีที่พิมพ์ 2548 ผมไม่ทราบว่า อาจารย์ท่านได้ปรับปรุงหนังสือเล่มนี้เป็นเล่มต่อมาอีกหรือไม่ หวังว่าคงไม่ตกข่าวนะครับสำหรับเรื่องนี้...

เริ่มต้นด้วยการกำหนดขอบเขตที่จะเล่าให้อ่านก่อนนะครับ เรื่องนี้เป็นเรื่องของการหาขนาดของค่ากระแสลัดวงจรโดยกำหนดแหล่งจ่ายไฟมาจากการไฟฟ้าฯที่มีค่าความสามารถในการจำหน่ายกระแสลัดวงจร 250, 300, 350, 500 MVA ข้อมูลนี้มาจาก *"MEA, PEA system, 3 phase fault level... up to year 1993"* (ข้อมูลนี้อ้างอิงจากหนังสือ *"high voltage power cables and their applications"* ของ phelps dodge, 1987) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงขนาดของ fault level ที่เคยใช้งาน

Installed capacity	Fault level
PEA's 11 & 22 kV	250
PEA's 33 kV	300
MEA's 12 kV	350
MEA's 12 kV (network area)	500
MEA's 24 kV	250

หมายเหตุ: *ปัจจุบันนี้ค่าต่างๆ เหล่านี้อาจเปลี่ยนแปลงไปแล้ว ก่อนนำไปใช้งานขอให้ท่านผู้อ่านได้โปรดตรวจสอบกับการไฟฟ้าในเขตพื้นที่ของท่านว่า ความสามารถในการจ่ายกระแสลัดวงจรมีค่าเท่าไร หากท่านผู้อ่านใดได้ข้อมูลแล้วจะกรุณาแจ้งผู้เขียนจักเป็นพระคุณยิ่งเพราะอยากทราบเช่นกัน แล้วจะได้นำไปใช้เพื่อลดขนาดกระแสลัดวงจรของเซอร์กิตเบรคเกอร์ที่จะใช้ หากเล็งเห็นขนาดที่คาดว่าจักลดลงได้*

ในการเขียนบทความครั้งนี้ขอเพิ่มการลัดวงจรที่ infinite bus เข้าไปอีกหนึ่งกรณีที่เราจะเรียนรู้ไปด้วยกันดังนั้นแหล่งจ่ายไฟหรือการไฟฟ้าฯที่สามารถจ่ายกระแสลัดวงจรทางด้านแรงดันกลางเราจะคำนวณที่ 250, 300, 350, 500 และ infinite bus รวมเป็นห้าค่า ก่อนที่จะเริ่มการคำนวณผู้เขียนอยากจะเสนอข้อมูลทางด้านหม้อแปลงไฟฟ้าเนื่องจากงานนี้เราสนใจกระแสลัดวงจรทางด้านแรงต่ำซึ่งต้องตกลงกันก่อนว่าเป็นด้านแรงต่ำที่ขนาด 400/230 V และมีคุณสมบัติที่เสนอเป็นตัวอย่างของบทความนี้ดังตารางที่ 2 (นำมาจากตารางที่ 11.2 ของหนังสือที่อ่านมาวันนี้) ดังนี้

33.□□□□□□□□□□□□□□(breaker).indd 33 12/16/13 8:41 PM

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติบางอย่างของหม้อแปลงที่จะใช้ประกอบการคำนวณ

พิกัดหม้อแปลง (kVA)	%Zk	Pls (kW)
315	4	3.9
400	4	4.6
500	4	5.5
630	4	6.5
800	6	11.0
1000	6	13.5
1250	6	16.4
1600	6	19.8
2000	6	24.0
2500	6	26.8

เมื่อข้อมูลเบื้องต้นพร้อมสรรพแล้วเริ่มการคำนวณหากันเลย ขอเริ่มต้นด้วยการกำหนดสถานะการณ์จำลองเป็นอาคารที่ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง (เมื่อประมาณปี 1993) ที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าจะจ่ายได้ในขณะเกิดการลัดวงจร 350 MVA ที่จำหน่ายแรงดัน 12 kV อาคารนี้ออกแบบให้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 12 kV-400/230 V ขนาด 1600 kVA มีค่า voltage impedance เท่ากับ 6% เมื่อหม้อแปลงชุดนี้จ่ายกำลังไฟฟ้าเต็มพิกัดจะมีการสูญเสียเป็นความร้อนเนื่องจากความต้านทานของขดลวดที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 19.8 kW จากหม้อแปลงไฟฟ้าได้ออกแบบสายแรงต่ำมายังตู้เมนไฟฟ้าที่ห่างออกไป 30 เมตรด้วยสาย NYY ติดตั้งในท่อ HDPE จำนวน 6 ชุดโดยใช้สายไฟฟ้าขนาด 300 ตารางมิลลิเมตร ให้หาขนาดกระแสลัดวงจรหากเกิดการลัดวงจรในตู้เมนไฟฟ้าที่ขั้วเซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับสายป้อนทางด้านโหลด จากข้อมูลข้างต้นสามารถจัดหมวดหมู่ให้ดูง่ายขึ้นเป็นดังนี้

ก. ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า

S''_{ko} = 350 MVA (fault level) ที่แรงดัน 12 kV

U_{nt} = 400 V

ข. หม้อแปลงไฟฟ้าของอาคาร

S_{nt} = 1600 kVA

Z_k = 6%

P_{ls} = 19.8 kW

ค. ขนาดสายแรงต่ำจากหม้อแปลง

n = 6 ชุด (จำนวนสายที่ขนานกันต่อเฟส)

q = 300 ตร.มม. (ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายเมนแรงต่ำแต่ละเส้น)

l = 30 เมตร (ระยะที่ติดตั้งสายจากหม้อแปลงมายังตู้เมนแรงต่ำ)

ρ = 0.01786 mΩ-sq.mm./m (Cu. Specific resistance at 20 ˚c)

χ' = 0.08 mΩ/m (Inductive reactance; valid for cable & 50Hz)

เมื่อเราสามารถทำความตกลงกันได้หลักว่า แต่ละประเด็นที่เราสนใจอยู่ที่จำนวนต่างๆ เราสามารถนำค่าตัวแปรมากำหนดขนาดเพื่อใช้แทนค่าลงไปในสูตรคำนวณที่จะได้กล่าวต่อไปพร้อมกับการทำความเข้าใจตกลงกันก่อน ต่อไปให้ทุกท่านร่วมจินตนาการว่า เมื่อเกิดการลัดวงจรทางด้านแรงต่ำในตำแหน่งที่โจทย์กำหนด ค่าแรงดันทางด้านแรงต่ำเราทราบแล้วว่าเท่ากับ 400 โวลท์ จากสูตรคำนวณหาค่ากระแส (i) มีค่าเท่ากับ v/z หรือเป็นสัดส่วนของขนาดแรงดันกับขนาดของค่าอิมพีแดนซ์(Z) ในที่นี้เราไม่ทราบค่าอิมพิแดนซ์ เราต้องทำการหาค่าอิมพิแดนซ์ดังกล่าวในที่นี้วิธีการต้องทำการหาค่ารีซีสแต้นซ์(R) และค่ารีแอกแต้นซ์ที่(X) แต่ละตำแหน่ง โดยที่ทุกค่าต้องถูกย้ายมาอยู่ที่ตำแหน่งทางด้านแรงต่ำ ต่อไปเราจะเริ่มเรียนรู้ว่า การคำนวณและการย้ายค่าต่างๆ ทั้ง Z, R และ X ไปรวมกันที่ฝั่งด้านแรงต่ำ เริ่มที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าซึ่งในที่นี้คือการไฟฟ้าฯ จะมีขนาดของแรงดันเป็นค่า $cU_{nQ}\sqrt{3}$) โดยที่ c คือ ตัวประกอบแรงดัน เราจะเลือกค่าสูงสุดที่ทำให้เกิดกระแสลัดวงจรสูงสุดหรือ c_{max} ที่แรงดันกลางที่มากกว่า 1 kV จนกระทั่งถึง 35 kV เราจะใช้ค่า 1.10 โดยที่ Un มีค่าที่ 12 kV หรือหากที่จังหวะอยากจะหาค่าแรงดันที่เกิดขึ้นเมื่อมีการลัดวงจรจึงมีค่าเท่ากับ $1.10 \times 12\sqrt{3}$ ได้ค่าเท่ากับ 7.62 kV แต่เราจะขอเก็บค่านี้ไว้ในใจก่อนจนกว่าจะรวบรวมสูตรจนครบสรรพ

33.□□□□□□□□□□□□□(breaker).indd 34 12/16/13 8:41 PM

จึงจะแทนค่าครั้งเดียวเพื่อกันการสับสน ค่าแรงดันนี้ ($cUn\sqrt{3}$) นำมาคำนวณหาค่าอิมพิแดนซ์ (Z_Q) จากสูตร $Z = V^2/P$ ในที่นี้ V เท่ากับ $cU_{nQ}/\sqrt{3}$ และ P เท่ากับ $S"_{ko}$ หรือเท่ากับ $\sqrt{(3)}VI$ หรือเท่ากับ $\sqrt{3}V^2/Z$ เมื่อนำค่า V และ P จะได้ค่า Z_Q เท่ากับ $\sqrt{3}[cU^2_{nQ}/\sqrt{3}]/S"_{ko}$ หรือเท่ากับ $[cU^2_{nQ}]/S"_{ko}$ ต่อไปพิจารณาว่าการเกิดลัดวงจรทางด้านแรงต่ำจะต้องส่งผ่านกระแสลัดวงจรด้านแรงสูงส่งต่อไปยังแรงต่ำด้วย turn ratio (t_r) ของหม้อแปลงก็คือค่า 12x1000/400 ในที่นี้จะใช้สัญลักษณ์เป็น t_r เมื่อต้องการย้ายค่า Z_Q มาอยู่ทางด้านแรงต่ำผ่านค่า turn ratio จะได้สูตรใหม่เป็น $[cU^2_{nQ}]/S"_{ko} \times 1/t^2_r$ พอมาถึงตรงนี้เราจะได้ค่าอิมพิแดนซ์ที่มาจากการจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฯ และได้ทำการย้ายมาทางด้านแรงต่ำแล้ว ก่อนแทนค่าขอกระซิบนิดหนึ่งว่า การวิเคราะห์ยังไม่ใคร่สะเด็ดน้ำเท่าใด ท่านใดจักขยายความยินดี แต่ผู้เขียนเห็นว่าเป้ามาถึงที่หมายเกรงจักเยิ่นเย้อขอคร่าวๆ อย่างนี้ ขออย่าว่ากันนะครับ ต่อไปขอแทนค่าหาค่า Z_Q มีค่าดังนี้

$Z_Q = \{[1.10x\ (12x1000)^2] \times ((400)^2/(12x1000)^2\}/350x10^6$

; ตัด $(12x1000)^2$ ออก

จะได้ค่า Z_Q เป็นดังนี้

$Z_Q = 1.10x400^2/350x10^6 = 0.0005028\ \Omega$

$Z_Q = 0.5028\ m\Omega$

ระบบที่มีแรงดันไม่เกิน 35 kV จะได้ค่า $X_Q = 0.995\ Z_Q$ แทนค่า $X_Q = 0.995 \times 0.5028 = 0.5003\ m\Omega$

และค่า $R_Q = 0.1\ X_Q$ แทนค่า $R_Q = 0.1 \times 0.5003 = 0.0500\ m\Omega$

ต่อไปพิจารณาค่า Z_t, R_t และ X_t ซึ่งเกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้า จะสามารถคำนวณหาค่าอิมพิแดนซ์ (Z_t) เป็นการหามาจากค่าเปอร์เซ็นต์ Z ของหม้อแปลงที่ (U^2_{nt}/S_{nt}) จะได้เป็นดังนี้

$Z_t = (Z_k/100) \times (U^2_{nt}/S_{nt}) = (6/100) \times (400^2/1600x10^3)$

$= 0.006\ \Omega = 6.0000\ m\Omega$

จากค่ากำลังที่สูญเสียเนื่องจากค่าความต้านทานของขดลวดทั้งสองด้าน แสดงได้เป็น

$P_{ls} = \sqrt{3} \times I^2 \times R_t$ ปรับสมการใหม่เป็น $R_t = P_{ls}/(3xI^2)$ อีกด้านหนึ่งเพื่อแทนค่า I ของสมการของ R_t ดังนี้

$S_{nt} = \sqrt{3} \times U_{nt} \times I$ ปรับสมการใหม่เป็น $I = S_{nt}/(\sqrt{3} \times U_{nt})$ นำไปแทนค่าในสมการของ R_t เป็นสมการใหม่ดังนี้

$R_t = P_{ls}/(3 \times (S_{nt}/(\sqrt{3}x\ U_{nt}))^2) = P_{ls} \times 3 \times U^2_{nt}/(3 \times S^2_{nt})$

$= P_{ls} \times U^2_{nt}/S^2_{nt}$ แทนค่าตัวแปรเป็นดังนี้

$R_t = (19.8 \times 10^3) \times 400^2/(1600 \times 10^3)^2 = 0.0012375\ \Omega$

$= 1.2375\ m\Omega$

ต่อไปคำนวณหาค่า $X_t = SQRT(Z^2t - R^2t) = SQRT(6.0000^2 - 1.2375^2)$

$= 5.8710\ m\Omega$

ต่อไปพิจารณาค่า R_c และ X_c ซึ่งเกิดขึ้นที่สายไฟฟ้าแรงต่ำจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังตู้เมนไฟฟ้า จะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทาน (R_c) ดังนี้

$R_c = l \times \rho \times 10^3/(q \times n)$ เมื่อแทนค่าตัวแปรได้ค่าดังนี้

$R_c = 30 \times 0.01786 \times 10^3/(300 \times 6) = 0.2977\ m\Omega$

$X_c = \chi' \times l/n = 0.08 \times 30/6 = 0.4000\ m\Omega$

ขณะนี้เราได้คำนวณปริมาณต่างๆ ในเบื้องต้นจนครบถ้วนแล้ว เพื่อให้ความเข้าใจในการนำไปใช้งานที่ชัดเจนขอสรุปเป็นตารางดังตารางที่ 3 นี้

ตารางที่ 3 แสดงกระบวนการคำนวณโดยสรุป และคำนวณหาขนาดกระแสลัดวงจร

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ	กระบวนการคำนวณ	R (mΩ)	X (mΩ)
ก.ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า $S"_{ko}$ = 350MVA ที่แรงดัน 12kV U_{nt} = 400V	$Z_Q = 1.10x\ U^2_{nt}/S_{nt}$ $Z_Q = 1.10x400^2/350x10^6 = 0.0005028\ \Omega$ $Z_Q = 0.5028\ m\Omega$ $X_Q = 0.995\ Z_Q = 0.995 \times 0.5028$ $X_Q = 0.5003\ m\Omega$ $R_Q = 0.1\ X_Q = 0.1 \times 0.5003$ $R_Q = 0.0500\ m\Omega$	0.0500	0.5003
ข.หม้อแปลงไฟฟ้าของอาคาร S_{nt} = 1600 kVA	$Z_t = (Z_k/100) \times (U^2_{nt}/S_{nt})$ $Z_t = (6/100) \times (400^2/1600 \times 10^3)$		

33.□□□□□□□□□□□□□□(breaker).indd 35 12/16/13 8:41 PM

Z_k = 6% P_{ls} = 19.8 kW	$Z_t = 0.006\ \Omega = 6.0000\ m\Omega$ $R_t = P_{ls} \times U^2_{nt} / S^2_{nt}$ $R_t = (19.8 \times 10^3) \times 400^2 / (1600 \times 10^3)^2$ $R_t = 0.0012375\ \Omega = 1.2375\ m\Omega$ $X_t = SQRT\ (Z^2t - R^2t)$ $X_t = SQRT\ (6.0000^2 - 1.2375^2)$ $X_t = 5.8710\ m\Omega$	1.2375	5.8710
ค.ขนาดสายแรงต่ำจากหม้อแปลง N = 6 ชุด Q = 300 ตร.มม. L = 30 เมตร P = 0.01786 mΩ-sq.mm./m X' = 0.08 mΩ/m	$R_c = l \times \rho \times 10^3 / (q \times n)$ $R_c = 30 \times 0.01786 \times 10^3 / (300 \times 6)$ $R_c = 0.2977\ m\Omega$ $X_c = X' \times l\ / n = 0.08 \times 30 / 6$ $X_c = 0.4000\ m\Omega$	0.2977	0.4000
คำนวณหาค่า resistance และ reactance ซึ่งลัดวงจรที่ตู้เมน MDB: R_k, X_k		1.5852	6.7713
คำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่ตู้เมน MDB (rms: initial symmetrical 3-phase short-circuit current) $Z''_k = SQRT(R^2_k + X^2_k) = SQRT(1.5852^2 + 6.7713^2)$ $Z''_k = 6.9544\ m\Omega$ $I''_k = U_{nt} / (\sqrt{3} \times Z''_k) = 400/(\sqrt{3} \times 6.9544) = 33.2078\ kA_{rms}$			
คำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่ตู้เมน MDB (peak: prospective peak short-circuit current) $\kappa = 1.022 + 0.96899 \times e^{(-3.0301 \times Rk / Xk)} = 1.022 + 0.96899 \times e^{(-3.0301 \times 1.5852 / 6.7713)} = 1.4987$ $I_s = \sqrt{2} \times \kappa \times I''_k = \sqrt{2} \times 1.4987 \times 33.2078 = 70.3833\ kA_{peak}$			

ถึงบรรทัดนี้ได้ทำความเข้าใจหนึ่งตัวอย่างแล้วจนถึงแผงเมน MDB ต่อไปหากต้องการคำนวณต่อไปจนถึงแผงเมนย่อยเช่น SDB หรือแม้แต่เลยต่อไปจนกระทั่งถึงแผงโหลดเซนเตอร์ สามารถทำต่อได้โดยใช้กระบวนการคำนวณเช่นเดียวกับการคำนวณสายเมนแรงต่ำที่ผ่านมา คำนวณทีละลำดับได้ค่า R_{c2}, X_{c2} แล้วนำมารวมกับค่าที่มีอยู่ก่อนหน้านี้ จนได้ค่า Z"k คำนวณต่อไปจนได้ค่า I''_k , κ, และ I_s สำหรับท่านผู้อ่านที่มีโอกาสใช้งานขยายความสามารถจนกระทั่งถึงแผงโหลดเซ็นเตอร์ หรือถ้าหากมีใครจะลองคำนวณที่แต่ละขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า และแต่ละขนาดความสามารถในการจ่ายกระแสลัดวงจรที่ค่า MVA ค่าต่างๆ แล้วอาจนำข้อมูลมาโพสใน Facebook ของสมาคมฯเป็นแบ่งปันข้อมูลกันนะครับ...

ผู้เขียนบทความ

นายสุวิทย์ ศรีสุข
วิศวกรไฟฟ้า-ที่ปรึกษาอิสระ
การศึกษา ปริญญาตรี- วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ประสบการณ์ ทำงานกว่า 25 ปี งานด้านไฟฟ้ากำลัง

33.□□□□□□□□□□□□□□(breaker).indd 36 12/16/13 8:41 PM