CHAPTER 5

POWER SYSTEM STABILITY STUDY

บทนี้จะได้นำเอา Application ของ DAS มาใช้ในการแก้ปัญหา power system transient stability problem โดยการนำเอา system equation ของ one finite machine-to-infinite bus มา develope เพื่อให้ใช้ได้กับ Multimachine system ของ YEA วิธีการคำนวณเช่นนี้คล้าย ๆ กับว่านำเอา supper-position method มาใช้ให้เป็นประโยชน์ ทำให้การสนใจในเรื่อง stability ของเราได้ผล คือ สามารถจะหาได้ถึง stability ของ machine แต่ละตัว เมื่อเกิดความยุ่งยาก เช่น fault ที่ที่เดียวกัน และผลก็คือว่าสามารถที่จะ set relay และ breaker ต่าง ๆ เพื่อทำการตัดวงจรส่วนใดส่วนหนึ่งออกจาก system ให้ทันก่อนที่จะเกิด unstable ขึ้น

5.1 Introduction

ความสนใจของวิศวกรไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันนี้ได้โน้มเอียงไปในการใช้ Digital Computer แก้ปัญหาทางด้าน power system เพื่อที่จะทำการศึกษา อธิบาย และวางโครงการของ system ปัญหา system stability นี้ ได้มีผู้สนใจและทำการ develope วิธีการตลอดมา และเนื่องจากความรวดเร็วของ computer และความเข้าใจที่มีต่อเครื่องไม้เครื่องมือใน power system เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ วิศวกรจึงได้พยายามที่จะนำเอา effect ที่มีอยู่ใน system มาทำการ study อย่างละเอียด ทำให้การเขียน program ยุ่งยากมากขึ้น ตามสมการที่ develope ขึ้นมา

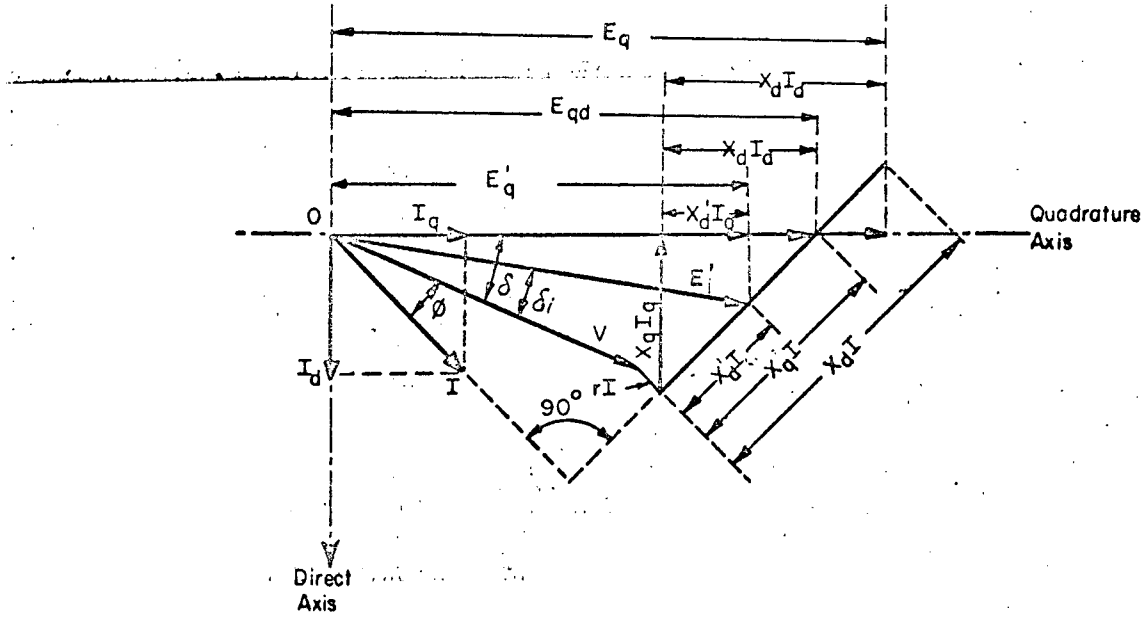
อย่างไรก็ตาม machine บางอย่างที่ผู้ออกแบบออกแบบตามจุดประสงค์อย่างหนึ่ง แต่ปรากฏว่าไปกระทบกระเทือนถึง system เช่น อาจจะทำให้ system กลับดีขึ้น หรืออาจจะเลวลงก็ได้ โดยที่จะต้องทำการ study อีกนานกว่าจะได้ mathematical model

ออกมา เช่น Damper winding ใส่ไว้ก็เพื่อต้องการจะ Suppress hunting และ damp aperiodic shock ได้ แต่ปรากฏว่ามีผลพลอยได้ คือ ให้ starting torque สูงกว่าธรรมดา เป็นต้น

เมื่อไรก็ตามที่เกิด unsymmtrical fault ขึ้นใน system, damper winding จะทำหน้าที่ให้ break torque แก่ generator ทำให้ลด accelerating power ลง นั่นคือ เราสามารถจะ set relay ได้ช้ากว่าที่ไม่ได้คิด ถึง ๑๐% โดยที่ system ยังคง stabilized อยู่

5.2 Power angle curve ของ salient pole machine.

5.2.1 คุณสมบัติของ salient pole machine ก็คือ ไม่มี field quadrature circuit นั่นคือ $I_q = E_d = 0$ ส่วน excitation voltage $E = jE_q$ จะต้องอยู่ที่ quadrature axis เสมอ ไม่ว่าขณะที่อยู่ใน transient state หรือ steady state ก็ตาม เราสามารถจะ express คุณสมบัติและลักษณะภายในของ machine ได้จาก vector diagram ต่อไปนี้.-



รูปที่ ๑๑ Vector diagram of salient-pole synchronous machine.

ในกรณีที่เรา neglect ค่า resistance แล้ว เราสามารถที่จะเขียน power angle equation ได้จากสมการ (๑)

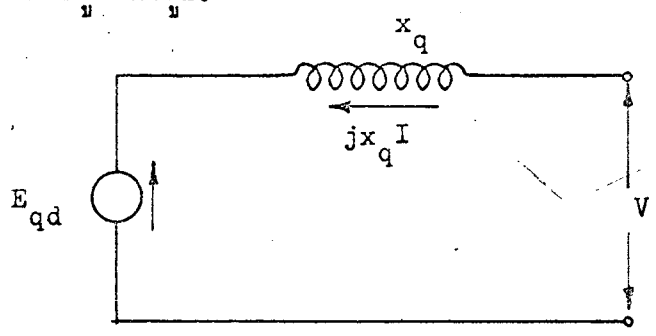
$$P = \frac{E_q V}{x_d} \sin\delta + V^2 \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} \text{Sin } 2\delta \qquad (1)$$

และถ้าไม่มี resistance เข้ามายุ่งแล้ว ค่า internal power กับ output power จาก armature terminal ต้องเท่ากัน

จากสมการจะเห็นว่า power output นี้ขึ้นอยู่กับค่าของ phase angle ในกรณีที่ δ ไม่เปลี่ยนแปลง P จะคงที่ และ δ ก็จะคงที่ด้วย

เมื่อเกิด distrubance ขึ้น ค่า E_q จะเปลี่ยนเป็น E_q ใหม่ และค่า V ซึ่งเป็น infinite bus voltage ก็จะเปลี่ยนไปด้วย ค่า δ จะเปลี่ยนจากค่าที่ steady state ไป อย่างไรก็ตาม สูตรใน (๑) ก็ยังคงใช้ได้ เพียงแต่ค่า E_q เปลี่ยนเป็น E'_q และ x_d เปลี่ยนเป็น x'_d เท่านั้น

5.2.2 วิธีการหาค่าต่าง ๆ ของ salient pole machine เนื่องจาก machine นี้ เราสามารถแทนได้ด้วย equivalence circuit ของ power source ที่มี voltage output = E_{qd} กับ quadrature axis synchronous reactance x_q ต่อ series กันอยู่ ดังรูป.



รูปที่ ๑๒ Method of representing a salient-pole synchronous generator.

---

(๑) Edward Wilson Kimbark, "Power system stability", Vol. III.

จากรูปจะเห็นว่า phase ของ E_{qd} ที่หาได้ก็คือ ตำแหน่งของ field จริง ๆ ใน machine

$$E_{qd} = V + jx_q I \qquad (2)$$

อย่างไรก็ตาม E_{qd} จะไม่คงที่ แม้ว่า E_q จะคงที่ก็ตาม relation ของ E_q และ E_{qd} จะมีดังนี้.-

$$E_{qd} = E_q + (x_q - x_d) I_d \qquad (3)$$

จะเห็นว่า E_{qd} ขึ้นอยู่กับค่า I_d แม้ว่า E_q จะคงที่ก็ตาม

การคำนวณหา swing equation ก่อนอื่นจะต้องหาค่า initial phase angle เสียก่อน ซึ่งค่านี้ก็คือ ค่า phase angle ที่ steady state ของ prefault condition สำหรับค่า electrical power output ให้คำนวณ E_q และ Infinite Infinite bus voltage ที่ condition ใหม่

5.3 ผลของ damper winding ที่ไปกระทบกระเทือน stability ของ system

5.3.1 Positive sequence daming เกิดจาก torque อันเนื่องจาก damper current ใน air gap ฉะนั้น ขณะที่ start หรือกำลังจะ pull out of step ของ slip จะต่ำมาก ทำให้ rotor oscillate หลังจาก aperiodic shock แล้ว แม้ว่าจะยังไม่เสีย synchronism ก็ตาม

เนื่องจาก 3 phase fault เป็น case ที่เลวที่สุดของจำนวน fault ทั้งหมดใน system และเพราะว่า positive sequence impedance อย่างเดียว ที่มีอยู่ใน 3 phase fault เท่านั้น ส่วน negative sequence impedance และ zero sequence impedance จะไม่นำมายุ่งเกี่ยวเลยทำให้ system network equation ง่ายลง และ power นี้ จะทำการพิจารณา case นี้อย่างเดียว ตามเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว

5.3.2 การคำนวณ positive sequence damping

จากสมการของ damping power ของ one finite machine-to-infinite bus (๑) คือ.-

$$P_d = E^2 \frac{(x'_d - x''_d)T''_{dO}}{(x + x'_d)^2} \sin^2\delta + \frac{(x'_q - x''_q)T''_{qO}}{(x+x'_q)^2} \cos^2\delta \frac{d\delta}{dt}$$

เมื่อ P_d = instantaneous damping power in per unit

E = voltage of infinite bus in per unit

x'_d, x'_q, x''_d, x''_q = machines reactance in per unit

x = external reactance in p.u. in series with armature

T''_{dO}, T''_{qO} = open-circuit subtransient time constants in the direct and quadrature axis, in second

δ = phase angle which machine leads the angle of the infinite bus.

เพื่อที่จะให้สมการนี้ใช้ได้กับ system ในประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับ YEA system ที่มีอยู่ในปัจจุบันนี้ และ system ที่กำลังจะขยายออกไปในอนาคตของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย สมการนี้จึงจำต้องแก้ไข และ develope ให้ใช้ได้กับ multimachine -system.

ก่อนอื่นให้พิจารณา two machine system เสียก่อน เมื่อต้องการคำนวณ damping power ของ machine หนึ่ง ๆ machine อีกอันหนึ่งให้ใช้ THEVENIN'S THEOREM derive open circuit equivalent emf. และค่า constant series reactance

---

(๑) Edward Wilson Kimbark, " Power system stability", Vol. III.

ของ system ทำให้ system กลายเป็นว่ามีเพียง machine เดียว equivalent reactance และ open circuit emf. ของอีก machine หนึ่ง ซึ่งถือว่าเป็น infinite bus voltage ของ machine ตัวที่กำลังจะหา Stability สำหรับ equivalence reactance ก็คือ external reactance ในสูตรที่ใช้ข้างบนนั่นเอง สิ่งที่น่าสังเกตอย่างหนึ่งก็คือ เวลาที่จะคำนวณ open circuit equivalent voltage กับ series reactance นั้น machine ตัวที่ต้องการหา stability damping power นี้ จะต้องปลดออกชั่วคราว

สำหรับใน multimachine ก็ใช้หลักนี้เช่นกัน โดยการแทน machine ที่ไม่ต้องการหา damping power ด้วย constant voltage source ส่วนหลักการทุกอย่างนั้นเหมือนกับ two machine system.

5.4 System Equations

จาก basic swing equation

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a$$

เมื่อ M เป็น angular momentum ของ machine

และ P_a เป็น accelerating power ซึ่งเรา define ไว้ว่า

$$P_a = P_i - P_u - P_b - P_d$$

เมื่อ P_i = input power to the machine

P_u = electrical power output

P_b = d.c. braking power

P_d = damping power

สำหรับ P_u และ P_d ได้กล่าวไว้แล้วใน 5.2 และ 5.3 แล้ว และจะได้นำเอาสมการทั้งสองมาคำนวณ ส่วน dc. braking power ซึ่งมี effect น้อยมาก และอยู่นอก scope ของเราจะไม่นำมาพิจารณา ณ ที่นี้

จาก System equation จะเห็นว่าสมการเป็นแบบ Differential equation แบบ second order โดยมี phase angle ของ system อยู่ที่ phase ค่าใดค่าหนึ่ง ส่วน phase velocity และ phase acceleration เป็น 0 ที่จะต้องมีค่า equilibrium point ของ final system

5.5 Liapunov Function.

ถ้ากำหนดให้ V(x) เป็น continuous scalar function ซึ่งเป็น Liapunov Function ของ System เมื่ออยู่ในลักษณะ equilibrium, System จะ stable หรือไม่ อาจจะรู้ได้จาก V(x) และ time derivative ของ V(x) ซึ่งในกรณีที่ System stable, form ของ trajectory ที่ออกมาจะต้องวนเข้าหาจุดใดจุดหนึ่งใน State space แต่ถ้าหากว่า System ไม่ Stable แล้ว trajectory จะวนออกไป

5.6 Numerical Example.

ค่าของ Equilibrium Generator Constant ที่เชื่อนภูมิพล

x_d	=	0.2728	p.u.
x'_d	=	0.092	p.u.
x''_d	=	0.0594	p.u.
x_q	=	0.1868	p.u.
x'_q	=	0.1868	p.u.
T''_{dO}	=	0.04	Sec.
T''_{qO}	=	0.07	Sec.
M	=	0.0011	

ค่าของ Generator constant ที่ โรงจักรพระนครเหนือ

x_d = 0.8 p.u.

x_d' = 0.091 p.u.

x_d'' = 0.055 p.u.

x_q = 0.785 p.u.

x_q' = 0.785 p.u.

x_q'' = 0.08 p.u.

T_{dO}'' = 0.04 sec.

T_{qO}'' = 0.07 sec.

M = 0.000691

สำหรับค่า Base unit ที่ใช้

BASE MVA = 100

BASE KV = 13.2/69/230

วิธีการ Reduce network และการคำนวณได้รวมอยู่ใน APPENDIX C Result ที่ได้ของตัวอย่างที่เกิด fault ที่ BB ได้แสดงไว้ใน APPENDIX D

สรุปแล้วจะเห็นว่า ในกรณีที่เกิด fault ที่ BB Bus 230 Generator ที่เชื่อมๆ จะ loss of synchronism ก่อนที่ breaker จะตัดออกเสียก่อน ส่วน generator ที่ โรงจักรพระนครเหนือยังสามารถรักษา synchronism อยู่ได้ ถ้า breaker ตัดกันภายใน 3 cycles