



ปีการศึกษา 2525

TRANSIENT STABILITY IN SYNCHRONOUS MACHINE

โดย

นาย สุรศักดิ์ วลิตวารังกูร

นาย สัมเกียรติ คุณเผือก

นาย วิริยะ เจริญศิลป์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ สมโภชน์ ประไพ

เลขหมู่ _____

เลขทะเบียน 08387

วัน, เดือน, ปี 14 ม.ค. 2530

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2525

เรื่อง TRANSIENT STABILITY IN SYNCHRONOUS MACHINE

ผู้จัดทำ

1. นายสุรศักดิ์ วลิตวรารักษ์
2. นายสมเกียรติ คุณเผือก
3. นายวิริยะ เจริญศิลป์

.....*สมโภชน์ ประทีป*.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์สมโภชน์ ประทีป)

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เรื่องนี้เป็นการศึกษาถึงเสถียรภาพของเครื่องจักรไฟฟ้า synchronous แต่ละตัวในระบบไฟฟ้ากำลังภายหลังจากเกิด fault และการนำเอา switching operations มาควบคุม fault โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะหาค่าของ critical clearing time โดยประมาณของระบบ multimachine เนื้อหาส่วนใหญ่เน้นหนักไปที่วิธีการแก้ swing equations โดยใช้เครื่อง computer เป็นตัววิเคราะห์ วิธีการที่ใช้มีลักษณะเป็นแบบ explicit fixed step integration โดยแยกออกเป็น 3 ส่วนคือ Modified Euler's methods, Runge Kutta's method และ Proposed method โดยคำนึงค่าตอม, storage, และ computer time เพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับ transient calculation มากที่สุด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	
สารบัญ	
บทที่ 1	<u>บทนำ</u>
บทที่ 2	<u>เครื่องจักรไฟฟ้า</u>
2.1	Reactance of Synchronous Machine
2.1.1	Direct-axis Synchronous Reactance
2.1.2	Quadrature-axis Synchronous Reactance
2.1.3	Direct-axis Transient Reactance
2.1.4	Direct-axis Subtransient Reactance
2.1.5	Quadrature-axis Transient Reactance & Subtransient Reactance
2.1.6	Negative-Sequence Reactance
2.1.7	Zero-sequence Reactance
2.2	Time Constant ของเครื่องจักรไฟฟ้า Synchronous
2.2.1	Direct-axis Transient Open Circuit Time Constant
2.2.2	Direct-axis Transient Short Circuit Time Constant
2.2.3	Direct-axis Subtransient Time Constant T''_{do} & T''_d
2.2.4	Quadrature-axis Time Constant T'_{qo} , T'_q , T''_{qo} , T''_q
2.2.5	Armature Short Circuit Time Constant T_a

2.3 การเปลี่ยนแปลงของ Armature Inductance ของเครื่องจักรไฟฟ้า Synchronous อันเนื่องมาจากตำแหน่งของตัว Rotor	9
2.4 Park's Transform	11
2.4.1 Flux Linkage ในแบบของ Park's Variable	12
2.5 Circuit Equation	13
2.6 Vector Diagrams	14
2.6.1 Vector Diagram สำหรับ Positive-sequence Steady State	14
2.6.2 Revised Equation ของเครื่องจักรไฟฟ้า Synchronous	18
2.6.3 Vector Diagram สำหรับ The Transient State	19
2.6.4 Transient State ของ Salient-pole Machine	22
2.7 การประยุกต์ทฤษฎีของเครื่องจักรไฟฟ้า Synchronous เข้ากับการศึกษา transient stability	23
2.7.1 Salient-pole Machine	24
2.7.2 Round Rotor Machine	24
2.8 Power Angle Curve ของ Salient-pole Machine	25
2.8.1 Steady State Power Angle Curve ของ Salient-pole Generator.	25
2.8.2 Transient Power Angle Curve ของ Salient-pole Synchronous Machine	28

	หน้า
บทที่ 3	30
<u>Swing Equation และวิธีการ Step-by-step</u>	30
3.1 บทนำ	30
3.2 Swing Equation	30
3.3 วิธีการ Step-by-step	32
3.3.1 Modified-Euler Method	34
3.3.2 Runge-Kutta Method	34
บทที่ 4	35
<u>Solution of Networks</u>	35
4.1 บทนำ	35
4.2 Network Representation	35
4.3 Faults Representation	38
4.4 Network Performance Equation	39
4.5 เทคนิคการหาค่าตอบ	43
บทที่ 5	47
<u>Conversion of Transient Stability Problem to Equivalent System Employing an Infinite Bus</u>	47
5.1 บทนำ	47
5.2 Two Finite Machine	47
5.3 Multi-Machine System	50
5.4 ลักษณะทั่วไปของระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องจักรไฟฟ้า synchronous m ตัว	56
5.5 Algorithm สำหรับแก้ปัญหา Swing Equation	57

	หน้า
บทที่ 6	59
<u>รายละเอียดของ program transient stability</u>	
<u>และผลการทดลอง</u>	
6.1 บทนำ	59
6.2 การเตรียมข้อมูล	59
6.3 Data Assembly และผลการทดลอง	59
6.4 การประมาณค่า Critical clearing Times.	90
บทที่ 7	91
<u>สรุปและวิจารณ์</u>	
7.1 สรุป	91
7.2 วิจารณ์	92
Appendix 1	
Appendix 2	
กิตติกรรมประกาศ	
หนังสืออ้างอิง	

ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของโรงจักรไฟฟ้าในแต่ละวัน ปัญหาที่พบมากที่สุดได้แก่ความไม่แน่นอนของ load และ disturbance ที่เกิดจากผลภายในและภายนอกในระบบ ซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า synchronous แต่ละตัวในระบบโดยตรง ความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว ในการที่จะปรับตัวเพื่อให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวโดยไม่เกิด lost synchronism แสดงว่าระบบมีเสถียรภาพ

จากลักษณะและความรุนแรงของ disturbance สามารถแยกเสถียรภาพของระบบออกได้เป็น 2 ลักษณะ

1. Transient Stability เกิดจาก disturbance ที่รุนแรงซึ่งได้แก่ fault ชนิดต่าง ๆ
2. Steady State Stability เกิดจาก disturbance ที่ไม่รุนแรงเช่น การเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของ load ในแต่ละวัน, ความไม่สม่ำเสมอของ prime-mover และอื่น ๆ

โอกาสที่ระบบจะสูญเสียเสถียรภาพอันเนื่องมาจากลักษณะที่ 1 จะมีได้มากกว่าลักษณะที่ 2 ผลเสียที่เกิดจากความไม่มีเสถียรภาพของระบบมีได้พอ ๆ กันในทุกส่วนของระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า synchronous และหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ดังนั้น จุดมุ่งหมายของหนังสือเล่มนี้จะเป็นการศึกษา transient stability ของระบบ multi-machine โดยเลือกใช้ 3- ϕ fault ซึ่งเป็น disturbance ที่รุนแรงที่สุดมาทำการทดสอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบเพื่อหาจุด weak point และค่า critical - clearing time และนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบระบบป้องกัน เพื่อให้ระบบมีความเชื่อถือได้ (reliability)

สำหรับรายละเอียดของหนังสือจะกล่าวเป็นบท ๆ ดังนี้

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงพฤติกรรมของเครื่องจักร synchronous และ machine parameter ที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบ

บทที่ 3 เป็นรายละเอียดเกี่ยวกับ swing equation และการนำเอาวิธีการของ step-by-step มาแก้สมการ swing equation

บทที่ 4 เป็นลักษณะของ network performance ของ multi-machine และการนำเอาคุณสมบัติของ matrix partition มาช่วยลดค่า cpu time ในการคำนวณค่าการส่งจ่ายกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขณะและหลังเกิด disturbance

บทที่ 5 เป็นการกล่าวถึงวิธีการของ Proposed Method ซึ่งเป็นวิธีการแก้สมการ swing equation โดยอาศัยพื้นฐานของ step-by-step แต่มีข้อที่ดียิ่งขึ้นหนึ่งคือสามารถที่จะเลือกเอาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใด ๆ ในระบบเป็นแกนอ้างอิงได้ โดยสมมุติให้มีคุณสมบัติเหมือน infinite bus ซึ่งจะมีประโยชน์มากสำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใด ๆ ในระบบขณะเกิด disturbance

บทที่ 6 เป็นรายละเอียดของ computer program และตัวอย่างโจทย์ที่ใช้ทดสอบพร้อมทั้ง solution

บทที่ 7 เป็นบทสรุป วิจารณ์ และโครงการที่จะทำต่อไปในอนาคต

เครื่องจักรไฟฟ้า synchronous

การศึกษาเกี่ยวกับ power system stability ก็เพื่อที่จะพิจารณาว่าภายหลังจากเกิด disturbance ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังแล้ว synchronous machine ในระบบไฟฟ้ากำลังจะกลับมา synchronize กันได้อีกหรือไม่ ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะของ synchronous machine จึงเป็นสิ่งที่สำคัญ

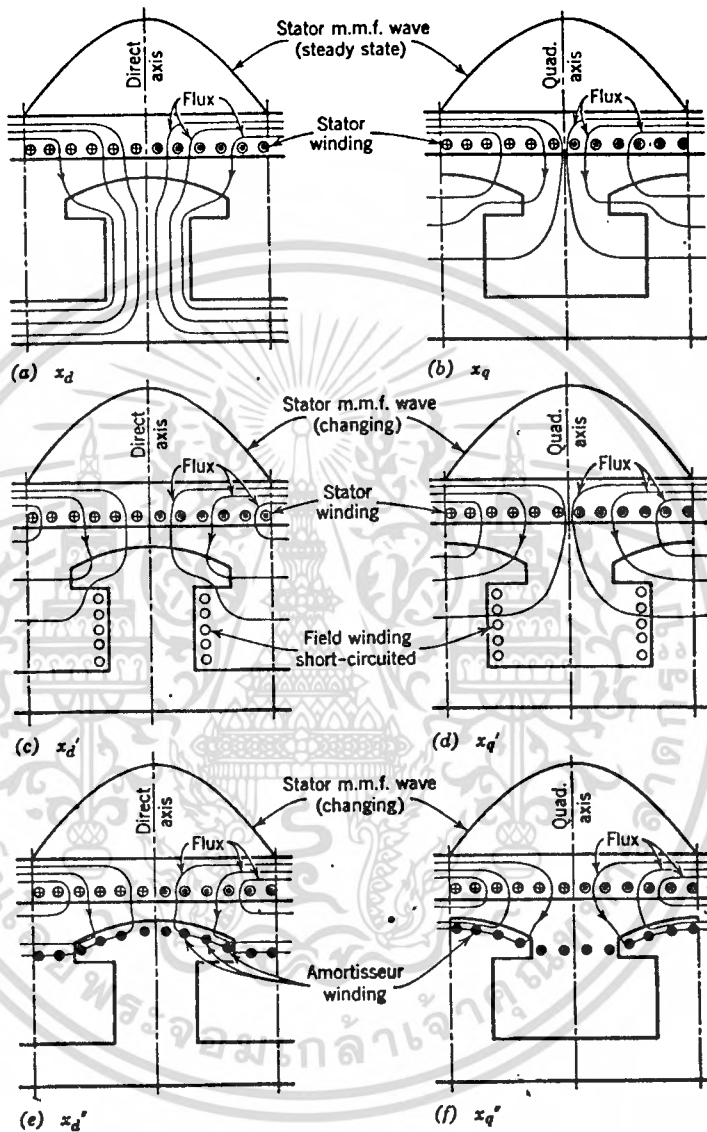
2.1 Reactance of Synchronous Machine

reactance ของ synchronous machine จำแนกออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

2.1.1 Direct-axis Synchronous Reactance

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า positive-sequence armature current จะทำให้เกิด rotating m.m.f wave ซึ่งจะหมุนไปด้วยความเร็ว synchronous speed เทียบกับ armature winding แต่จะอยู่นิ่งเทียบกับ pole axis

ขณะที่ armature circuit มีกระแสค่าหนึ่ง armature m.m.f wave จะมีค่าคงที่ แต่ค่าของ armature flux wave จะขึ้นกับตำแหน่งของตัวโรเตอร์ ถ้าหากว่าแนวแกนของ armature m.m.f wave อยู่แนวเดียวกับ pole axis หรือ direct axis ค่า reluctance ของ magnetic path จะมีค่าต่ำสุดเนื่องจากขนาดของ air gap ในเส้นทางดังกล่าวมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นค่า inductance ของ armature winding ในสภาวะดังกล่าวจะมีค่าสูงที่สุด ซึ่งมีชื่อเรียกกันว่า direct-axis synchronous inductance L_d และค่า $x_d = \omega \cdot L_d$ เรียกว่า direct-axis synchronous reactance ลักษณะการกระจายของ magnetic flux ตามเงื่อนไขว้ข้างต้น แสดงให้เห็นดังรูป (2.1a)



Flux paths for various reactances of a salient-pole synchronous machine.
 (a) Direct-axis synchronous reactance. (b) Quadrature-axis synchronous reactance.
 (c) Direct-axis transient reactance. (d) Quadrature-axis transient reactance.
 (e) Direct-axis subtransient reactance. (f) Quadrature-axis subtransient reactance.

รูปที่ 2.1

2.1.2 Quadrature Axis Synchronous Reactance X_q

ขณะที่เมื่อแนวแกนของ armature m.m.f wave อยู่แนวเดียวกับ interpolar หรือ quadrature axis ค่า air gap ในแนวตั้งกล่าวจะมีค่าสูงกว่า air gap ในแนว direct axis ดังนั้นค่า inductance ของ armature winding ในกรณีนี้จะต่ำกว่า L_d ค่า inductance ดังกล่าว เรียกว่า quadrature-axis synchronous inductance L_q และค่า $X_q = \omega \cdot L_q$ เรียกว่า quadrature-axis synchronous reactance ลักษณะการกระจายของ magnetic flux สำหรับเงื่อนไขในการนิยามค่า X_q แสดงให้เห็นดังรูปที่ (2.1b.)

2.1.3 Direct Axis Transient Reactance X_d'

เงื่อนไขในการนิยามค่า direct-axis transient reactance คล้ายกับกรณีของ direct-axis synchronous reactance ต่างกันตรงที่ positive-sequence armature current ถูกป้อนเข้า armature winding โดยทันทีทันใด ในกรณีดังกล่าวตัวโรเตอร์จะต้องหมุนไปด้วยความเร็ว synchronous speed ด้วยและแนวแกนของ armature m.m.f wave อยู่แนวเดียวกับ direct-axis ของตัวโรเตอร์และ field winding ครบวงจรแต่ไม่ได้ถูกกระตุ้น

armature m.m.f ที่เกิดขึ้นโดยทันทีทันใดพยายามที่จะสร้าง magnetic flux ผ่าน field winding ไปสู่ pole core ทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้นที่ field winding ซึ่งจะสร้าง m.m.f ท้าน armature m.m.f เพื่อคงค่า field flux linkage ให้มีค่าคงที่ (ตามทฤษฎี constant flux linkage)

ค่า magnetic flux ที่เกิดขึ้นโดยทันทีทันใดคือส่วนที่ไม่ได้คล้องผ่าน field winding ค่า reluctance ของ magnetic path จึงมีค่าสูงกว่ากรณีของ direct-axis synchronous reactance ลักษณะการกระจายของ magnetic flux

ตามเงื่อนไขดังกล่าว แสดงให้เห็นดังรูป (2.1c)

อัตราส่วนของ magnetic flux/ampere ในกรณีเรียกว่า direct-axis transient inductance L'_d และค่า $X'_d = \omega L'_d$ เรียกว่า direct-axis transient reactance

2.1.4 Direct-axis Subtransient Reactance

ในการนิยามค่า direct-axis transient reactance หากสมมุติว่าที่ตัวโรเตอร์ไม่มีวงจรมอเตอร์ไฟฟ้้าอื่นใดนอกจาก field circuit อย่างไรก็ตาม salient-pole synchronous machine จำนวนมากมี amortisseur (damper) winding ภายหลังจาก armature m.m.f เกิดขึ้นทันทีทันใด จะเกิดการแผ่ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่วงจรมอเตอร์ไฟฟ้้าทั้งหมดที่ตัวโรเตอร์ m.m.f ที่เกิดจากการแผ่เหนี่ยวนำ ที่วงจรมอเตอร์ไฟฟ้้าเหล่านั้นจะมีทิศทางทวนกับ armature m.m.f เพื่อที่จะรักษาสภาวะของการมีค่า flux linkage คงที่ (ตามทฤษฎี constant flux linkage) ดังนั้น magnetic flux ที่เกิดขึ้นทันทีทันใดจะมีเส้นทางไปในส่วนที่ไม่ผ่าน rotor circuit ซึ่งมีค่า reluctance สูงกว่ากรณีของ direct-axis transient reactance อัตราส่วนของ armature flux linkage/ampere ในกรณีนี้เรียกว่า direct-axis subtransient inductance L''_d และค่า $\omega L''_d$ เรียกว่า direct-axis subtransient reactance

2.1.5 Quadrature-axis Transient Reactance X'_q and Subtransient Reactance X''_q

สำหรับวิธีการนิยามค่า X'_q และ X''_q คล้ายกับวิธีการนิยามค่า X'_d และ X''_d เว้นเสียแต่ว่าแนวแกนของ armature m.m.f wave อยู่ในแนว quadrature-axis ลักษณะการกระจายของ magnetic flux ตามเงื่อนไขการนิยามค่า X'_q และ X''_q แสดงให้เห็นดังรูป (2.1d) และรูป (2.1e.) ตามลำดับ

2.1.6 Negative-sequence Reactance X_2

เงื่อนไขในการนิยามค่า x_2 คือ field structure หมุนไปในทิศทางปกติด้วยความเร็ว synchronous speed โดยที่ rotor circuit ทั้งหมดครบวงจร แต่ไม่ได้ถูกกระตุ้น ขณะที่ armature circuit ถูกป้อนด้วย negative-sequence current จะเกิด rotating m.m.f หมุนวนทิศทางการหมุนของตัวโรเตอร์ด้วยความเร็ว synchronous speed เทียบกับ armature winding ดังนั้นมันจะหมุนผ่านตัวโรเตอร์ด้วยความเร็วเป็นสองเท่าของ synchronous speed ค่าของ armature flux linkage/ampere ของ armature circuit กรณีนี้เรียกว่า negative-sequence reactance ปกติ ค่าโดยประมาณของ x_2 (1) มีค่าเป็น

$$X_2 = \frac{X_d + X_q}{2} \quad (2.1)$$

2.1.7 Zero-sequence Reactance X_0

ถ้า zero-sequence current ถูกป้อนเข้า armature circuit จะไม่มี space fundamental m.m.f เกิดขึ้นที่ air gap แต่จะมี space harmonic m.m.f ที่อยู่หนึ่งเกิดขึ้น magnetic flux ที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยทำให้ zero-sequence reactance X_0 มีค่าต่ำ โดยจะต่ำกว่า X_d

2.2 Time Constance of synchronous Machine

ในช่วง transient period ของ synchronous machine ค่าของกระแสไฟฟ้าและโวลต์เตจในวงจรไฟฟ้าต่าง ๆ จะเปลี่ยนแปลงขนาดไป โดยที่จะลดลงด้วยค่า time constant ค่าใดค่าหนึ่งจากค่า time constant ต่อไปนี้

2.2.1 Direct-axis Transient Open Circuit Time Constant T'_{d0}

ถ้าหาก armature circuit เปิดวงจรและไม่มี amortissue winding การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าใน field winding จะไม่ขึ้นกับวงจรไฟฟ้าอื่นใด ภายใต้งื่อนไขนี้ การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าใน field winding จะเปลี่ยนแปลงลดขนาดลงด้วยค่า time constant ที่เรียกว่า direct-axis transient open circuit time constant T'_{d0} โดยที่

$$T'_{d0} = L_{ff}/R_{ff} \quad (2.2)$$

เมื่อ L_{ff} คือค่า self-inductance ของ field circuit และ R_f คือค่าความต้านทานของวงจรดังกล่าว

2.2.2 Direct-axis Transient Short-circuit Time Constant T'_d

ถ้าหากว่าทั้ง field circuit และ armature circuit ครบวงจร ค่ากระแสไฟฟ้าในวงจรดังกล่าวจะเหนี่ยวนำซึ่งกันและกัน การเปลี่ยนแปลงของ d.c. current ใน field circuit และ a.c. current ใน armature circuit จะมีการลดขนาดลงด้วยค่า time constant ที่เรียกว่า direct-axis short-circuit

time constant T_d'

ค่า T_d' เป็นอัตราส่วนของ apparent inductance ของ field winding เมื่อ armature circuit ครบวงจรต่อค่า apparent resistance ของมัน ในช่วง transient period ค่า T_d' จะต่ำกว่า T_{d0}' เพราะค่า effective inductance ของ field winding เมื่อ armature circuit ครบวงจรจะต่ำกว่าค่า self-inductance ของมัน เปรียบเทียบได้กับกรณีของหม้อแปลงไฟฟ้าค่า open-circuit inductance มากกว่า short circuit inductance (1)

ในกรณีของหม้อแปลงไฟฟ้าอัตราส่วนของ short-circuit inductance/ open-circuit inductance มีค่าเท่ากับ 2 คำน (1) ดังนั้นในกรณีของ

synchronous machine อัตราส่วนของ self-inductance/ apparent ของ field circuit จะมีค่าเท่ากับ L_d'/L_d หรือ x_d'/x_d ทำให้ได้ว่า

$$T_d' = \frac{x_d'}{x_d} T_{d0}' \quad (2.3)$$

2.2.3 Direct-axis Subtransient Time Constant T_{d0}'' and T_d''

ถ้าหากว่า synchronous machine มี amortisseur winding ที่ตัวโรเตอร์จะประกอบด้วยวงจรไฟฟ้า 2 วงจรที่สร้าง m.m.f ในแนว direct-axis ดังนั้นในแต่ละวงจรจะประกอบด้วยค่า time constant 2 ค่า ซึ่งขึ้นกับ impedance ของ armature circuit ค่าที่มากกว่าเรียก transient time constant ค่าที่น้อยกว่าเรียกว่า subtransient time constant ถ้าหากว่า armature circuit เปิดวงจร ค่า time constant ดังกล่าวจะเป็น T_{d0}'' และ T_{d0}'' ถ้าหากว่า armature circuit ปิดวงจร ค่า time constant จะเป็น T_d'' และ T_d''

2.2.4 Quadrature-axis Time Constant $T'_{q0}, T'_q, T''_{q0}, T''_q$

การนิยามค่า T'_{q0}, T'_q, T''_{q0} และ T''_q คล้ายกับการนิยามค่า T'_{d0}, T'_d, T''_{d0} และ T''_d เพียงแต่ว่าเกี่ยวข้องกับ quadrature-axis แทนที่จะเป็น direct-axis

2.2.5 Armature Short Circuit Time Constant T_a

ค่า T_a เป็นค่า time constant ของกระแสตรงใน armature circuit และกระแสสลับใน field circuit และ amortisseur winding (ทั้งสองวงจรครบวงจร) ค่า T_a มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของ armature inductance / armature resistance ภายใต้งานไขคังกลาว ค่าของ armature inductance ในกรณีนี้จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ negative-sequence inductance L_2 (1)

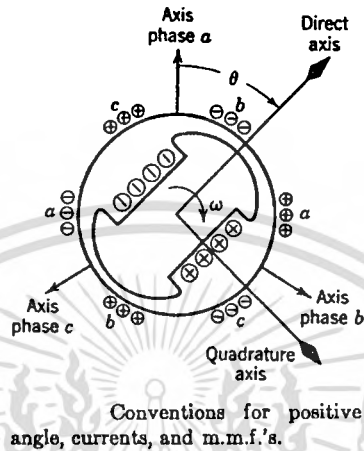
$$T_a = L_2 / r_a \tag{2.4}$$

2.3 Variation of Armature Inductance of Synchronous Machine

Due to Rotor Position

ค่า armature inductance จะไม่คงที่แต่จะแปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งของตัวโรเตอร์ ถ้าหากว่าให้ θ เป็นมุมระหว่าง direct axis และ axis of phase a ดังแสดงในรูป (2.2) ค่า θ เป็น function ของเวลา t ตามสมการ

$$\theta = \omega t + \theta_0 \tag{2.5}$$



รูปที่ 2.2

ค่า self-inductance และค่า mutual-inductance ของ armature circuit ทั้งสามเฟสจะเป็น

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos(2\theta) \quad (2.6)$$

$$L_{bb} = L_s + L_m \cos(2\theta + 120) \quad (2.7)$$

$$L_{cc} = L_s + L_m \cos(2\theta - 120) \quad (2.8)$$

$$L_{ab} = L_{ba} = -M_s + L_m \cos(2\theta - 120) \quad (2.9)$$

$$L_{bc} = L_{cb} = -M_s + L_m \cos(2\theta) \quad (2.10)$$

$$L_{ca} = L_{ac} = -M_s + L_m \cos(2\theta + 120) \quad (2.11)$$

ค่า self-inductance ของ field circuit คงที่แต่ mutual-inductance ระหว่าง field circuit กับ armature circuit จะขึ้นกับตำแหน่งของตัวโรเตอร์ และเป็นไปตามสมการ

$$L_{af} = L_{fa} = M_f \cos \theta \quad (2.12)$$

$$L_{bf} = L_{fb} = M_f \cos(\theta - 120) \quad (2.13)$$

$$L_{cf} = L_{fc} = M_f \cos(\theta + 120) \quad (2.14)$$

เนื่องจาก θ เป็น function ของเวลา t การแก้สมการของ synchronous machine โดยตรงจึงยุ่งยาก

2.4 Park's Transform

R.H. PARK ได้เสนอวิธีการที่จะแก้สมการต่าง ๆ ของ synchronous machine ให้ง่ายขึ้นโดยการ transform ตัวแปรของระบบตัวแปรเดิมไปสู่ระบบของตัวแปรระบบใหม่ (เรียกว่าตัวแปรของ Park) เช่นถ้าหาก armature circuit มีกระแสไฟฟ้าเป็น i_a, i_b และ i_c แล้วจะมีความสัมพันธ์กับระบบกระแสไฟฟ้าใหม่ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta-120) & -\sin(\theta-120) & 1 \\ \cos(\theta+120) & -\sin(\theta+120) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta-120) & \cos(\theta+120) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta-120) & -\sin(\theta+120) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

สำหรับค่ากระแสของ field circuit i_f ไม่ต้องใช้ในการ transform

2.4.1 Flux Linkage Interm of Park's Variable

Flux linkage ของ synchronous machine จะเป็นไปตามสมการ

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

จากสมการ (2.17) ถ้าเรา transform $[\psi]_{a,b,c,f}$ ไปเป็น $[\psi]_{d,q,0,f}$ และ $[I]_{a,b,c,f}$ ไปเป็น $[I]_{d,q,0,f}$ โดยวิธีการของ Park เราจะได้สมการ flux linkage equation ในรูปของ Park's variable ดังนี้คือ

$$\Psi_d = L_d i_d + M_f i_f \quad (2.18)$$

$$\Psi_q = L_q i_q \quad (2.19)$$

$$\Psi_0 = L_0 i_0 \quad (2.20)$$

$$\Psi_f = \frac{3}{2} M_f i_d + L_{ff} i_f \quad (2.21)$$

โดยที่

$$L_d = L_s + M_s + \frac{3}{2} L_m \quad (2.22)$$

$$L_q = L_s + M_s - \frac{3}{2} L_m \quad (2.23)$$

$$L_0 = L_s - 2M_s \quad (2.24)$$

2.5 Circuit Equation

ถ้าเรา transform $[v]_{a,b,c}$ ไปเป็น $[v]_{d,q,0}$ แล้วแทนค่า $[i]_{a,b,c}$ และ $[\Psi]_{a,b,c}$ ให้อยู่ในรูปของ $[i]_{d,q,0}$ และ $[\Psi]_{d,q,0}$ ตามลำดับ เราจะได้

$$v_d = r i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q \quad (2.25)$$

$$v_q = r i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d \quad (2.26)$$

$$v_0 = r i_0 + \frac{d\Psi_0}{dt} \quad (2.27)$$

เมื่อแทนค่า ψ_d , ψ_q และ ψ_0 จากสมการ (2.18), (2.19) และ (2.20) ลงในสมการ (2.25), (2.26) และ (2.27) จะได้

$$v_d = r i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega \cdot L_q i_q + M_f \frac{di_f}{dt} \quad (2.28)$$

$$v_q = r i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega \cdot (L_d i_d + M_f i_f) \quad (2.29)$$

$$v_0 = r i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} \quad (2.30)$$

$$v_f = r_f i_f + L_{ff} \frac{di_f}{dt} + \frac{3}{2} M_f \frac{di_d}{dt} \quad (2.31)$$

2.6 Vector Diagrams

2.6.1 Vector Diagram for Positive-Sequence Steady State

ที่สภาวะ steady state กระแสไฟฟ้าใน field circuit คงที่ ดังนั้น

$$i_f = I_f \quad (\text{constant}) \quad (2.32)$$

สำหรับ armature circuit

$$i_a = I \cos(\omega t + \beta) = \text{Re}(\bar{I} \angle \omega t) \quad (2.33)$$

$$i_b = I \cos(\omega t + \beta - 120) = \text{Re}(\theta^2 \bar{I} \angle \omega t) \quad (2.34)$$

$$i_c = I \cos(\omega t + \beta + 120) = \text{Re}(a \bar{I} \angle \omega t) \quad (2.35)$$

เมื่อ

$$\bar{I} = I/\beta \tag{2.36}$$

เมื่อเราใช้ Park's transform เราจะได้

$$i_d = I \cos \beta = I_d \tag{2.37}$$

$$i_q = I \sin \beta = I_q \tag{2.38}$$

$$i_0 = 0 \tag{2.39}$$

Park's fluxes คือ

$$\psi_d = L_d I_d + M_f I_f \tag{2.40}$$

$$\psi_q = L_q I_q \tag{2.41}$$

$$\psi_0 = 0 \tag{2.42}$$

$$\psi_f = \frac{3}{2} M_f I_d + L_{ff} I_f \tag{2.43}$$

ที่ steady state นั้น $\frac{d\psi_q}{dt}$ และ $\frac{d\psi_f}{dt}$ มีค่า = 0 ดังนั้นจากสมการ (2.25) และ (2.26) จะได้

$$\begin{aligned} v_d &= rI_d - \omega\psi_q = rI_d - L_q\omega I_q = rI_d - X_q I_q \\ &= V_d \text{ (constant)} \end{aligned} \tag{2.44}$$



$$\begin{aligned}
 v_q &= rI_q + \omega\psi_d = rI_q + \omega \cdot L_d I_d + \omega \cdot M_f I_f \\
 &= rI_q + X_d I_d + E_q \\
 &= v_q \text{ (constant)}
 \end{aligned}
 \tag{2.45}$$

โดยที่

$$E_q = \omega \cdot M_f I_f \tag{2.46}$$

คือ excitation voltage (voltage behind synchronous impedance
 หรือ steady state internal voltage) ดังนั้นเราจะใ้ค่า armature current
 คือ

$$\begin{aligned}
 \vec{I} &= I \angle \beta = I (\cos \beta + j \sin \beta) \\
 &= I_d + j I_q
 \end{aligned}
 \tag{2.47}$$

และในห่านองเดียวกัน

$$\vec{V} = V_d + jV_q \tag{2.48}$$

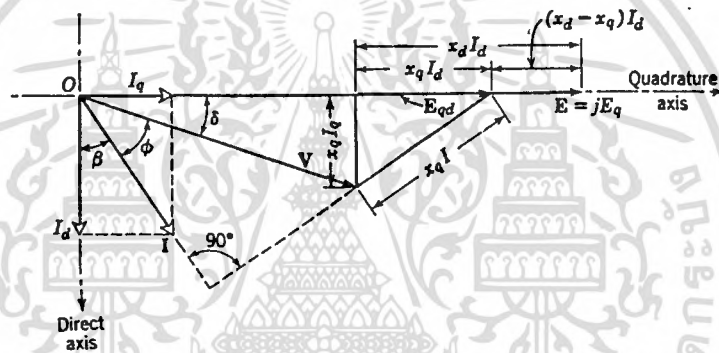
$$\vec{E} = 0 + jE_q = j\omega M_f I_f \tag{2.49}$$

จากสมการ (2.44), (2.45) และ (2.48) จะได้

$$\vec{V} = \vec{E} + r\vec{I} + jX_d I_d - X_q I_q \tag{2.50}$$

สำหรับสมการที่ได้ derived ในหัวข้อ 2.6.1 นี้เป็นกรณีของ motor ถ้าหากต้องการสมการกรณีของ generator ก็เพียงแค่อัดเครื่องหมายของ I_d ; I_q และ I_o เป็นเครื่องหมายตรงกันข้าม

สำหรับ vector diagram ของ salient-pole synchronous generator แสดงให้เห็นดังรูป (2.3) โดยที่แกน real axis มีทิศทางลงในแนวตั้งตามความนิยม



Steady-state vector diagram of salient-pole synchronous generator with lagging (demagnetizing) current; resistance neglected.

รูปที่ 2.3



2.6.2 Revised Equation of Synchronous Machine

เพื่อความสะดวกในการพิจารณาถึง vector diagram ของ synchronous machine ภายใต้สภาวะ transient state ในหัวข้อต่อไป จึงควรที่จะได้รูปสมการที่สำคัญไว้ในหัวข้อนี้ และเนื่องจากในหัวข้อที่ผ่านมา เราไม่ได้คำนึงถึง quadrature rotor circuit ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงให้นำเอามาพิจารณาคู่ (subscript q สำหรับ quadrature rotor circuit)

$$\Psi_d = M_f i_f - L_d i_d \quad (2.51)$$

$$\Psi_q = M_g i_g - L_q i_q \quad (2.52)$$

$$\Psi_f = L_{ff} i_f - \frac{3}{2} M_f i_d \quad (2.53)$$

$$\Psi_g = L_{gg} i_g - \frac{3}{2} M_g i_g \quad (2.54)$$

$$v_d = -r I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q \quad (2.55)$$

$$v_q = -r I_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d \quad (2.56)$$

$$v_d = -r I_d + M_f \frac{di_f}{dt} - L_d \frac{di_d}{dt} - \omega M_g i_g + \omega L_q i_q \quad (2.57)$$

$$v_q = -r I_q + M_g \frac{di_g}{dt} - L_q \frac{di_q}{dt} + \omega M_f i_f - \omega L_d i_d \quad (2.58)$$

$$v_f = r_f i_f + L_{ff} \frac{di_f}{dt} - \frac{3}{2} M_f \frac{di_d}{dt} \quad (2.59)$$

$$0 = r_g i_g + L_{gg} \frac{di_g}{dt} - \frac{3}{2} M_g \frac{di_g}{dt} \quad (2.60)$$

$$V_d = -pI_d + X_q I_q + E_d \quad (2.61)$$

$$V_q = -rI_q - X_d I_d + E_q \quad (2.62)$$

$$E_q = \omega \cdot M_f I_f \quad (2.63)$$

$$E_d = -\omega \cdot M_g I_g \quad (2.64)$$

$$\bar{I} = I_d + jI_q \quad (2.65)$$

$$\bar{V} = V_d + jV_q \quad (2.66)$$

$$\bar{E} = E_d + jE_q \quad (2.67)$$

$$\bar{V} = \bar{E} - r\bar{I} - jX_d I_d + X_q I_q \quad (2.68)$$

2.6.3 Vector Diagram for The Transient State

ในช่วงของ transient period อันคัมแรก flux linkage ψ_f ของ field winding ถือว่าคงที่ ($r_f \ll L_{ff}$) และ internal armature voltage ถูกนิยามว่าเป็นสัดส่วนกับ field flux linkage คือ

$$E'_q = \frac{\omega \cdot M_f}{L_{ff}} \psi_f \quad (2.69)$$

ดังนั้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงของ armature current อาจถือได้ว่า E'_q คงที่และจากสมการ (2.63) และ (2.64) จะได้ว่า

$$E_q - E'_q = \omega \cdot M_f i_f - \frac{\omega \cdot M_f}{L_{ff}} \psi_f \quad (2.70)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า Ψ_f จากสมการ (2.53) ลงในสมการ (2.70) จะได้

$$E_q - E'_q = \frac{3\omega M_f^2}{2L_{ff}} \cdot i_d \quad (2.71)$$

เนื่องจากว่า

$$L_d - \frac{3M_f^2}{2L_{ff}} = L'_d$$

สมการ (2.71) จะกลายเป็น

$$E_q - E'_q = \omega(L_d - L'_d) i_d \quad (2.72)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$E_q - X_d i_d = E'_q - X'_d i_d \quad (2.73)$$

นำผลจากสมการ (2.73) แทนลงในสมการ (2.62) จะได้

$$V_q = -rI_q - X'_d I_d + E'_q \quad (2.74)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$V_d = -rI_d + X'_q I_q + E'_d \quad (2.75)$$

จากสมการ (2.66), (2.74) และ (2.75) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \bar{V} &= -r(I_d + jI_q) + X'_q I_q - jX'_d I_d + (E'_d + jE'_q) \\ &= -r\bar{I} - jX'_d I_d + X'_q I_q + E' \end{aligned} \quad (2.76)$$

เมื่อ

$$E' = E'_d + jE'_q \quad (2.77)$$

สำหรับ E' นี้เรียกว่า voltage behind transient impedance

ในช่วง transient period นี้ I_d และ I_q จะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ โดยที่ขนาดของมันจะค่อยลดลง ถ้าหากว่าการเปลี่ยนแปลงของ I_d และ I_q เป็น ΔI_d และ ΔI_q ตามลำดับ สิ่งที่จะเปลี่ยนแปลงตามมาคือ

$$\Delta \psi_f = 0 \quad (2.77)$$

$$\Delta \psi_g = 0 \quad (2.78)$$

$$\Delta \psi_d = -L'_d \cdot \Delta I_d \quad (2.79)$$

$$\Delta \psi_q = -L'_q \cdot \Delta I_q \quad (2.80)$$

$$\Delta I'_f = \frac{3 M_f}{2 L_{ff}} \cdot \Delta I_d = \frac{L_d - L'_d}{M_f} \cdot \Delta I_d \quad (2.81)$$

$$\Delta I_g = \frac{3 M_g}{2 L_{gg}} \cdot \Delta I_q = \frac{L_q - L'_q}{M_g} \cdot \Delta I_q \quad (2.82)$$

$$\Delta E_q = (X_d - X'_d) \cdot \Delta i_d \quad (2.83)$$

$$\Delta E_d = (X_q - X'_q) \cdot \Delta i_q \quad (2.84)$$

$$\Delta E'_q = 0 \quad (2.85)$$

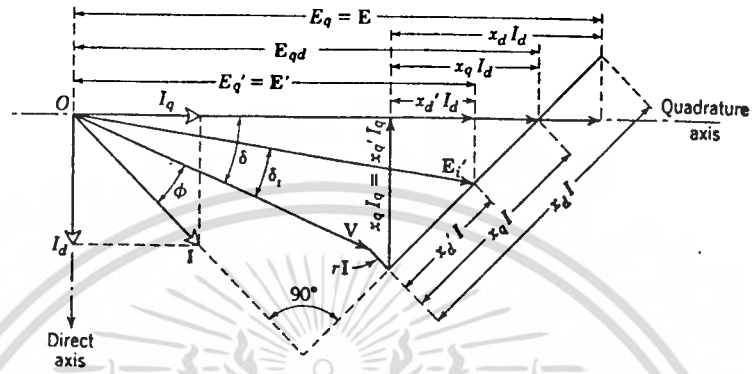
$$\Delta E'_d = 0 \quad (2.86)$$

$$\Delta v_q = -r \cdot \Delta I_q - X'_d \cdot \Delta I_d \quad (2.87)$$

$$\Delta v_d = -r \cdot \Delta I_d - X'_q \cdot \Delta I_q \quad (2.88)$$

2.6.5 Transient State of Salient-pole Machine

เนื่องจาก salient-pole machine ไม่มี quadrature field circuit ดังนั้น $I_g = 0$ และ $E_d = 0$ ทำให้ $\vec{E} = jE'_q$ ตลอดเวลานั้นคือ excitation voltage จะอยู่บนแกน imaginary ตลอดเวลาไม่ว่าจะเป็นสภาวะ transient หรือ steady state และเนื่องจาก $X'_q = X_q$ และ $E_d = -E'_d = 0$ ทำให้ $\vec{E} = jE'_q$ อยู่บนแกน imaginary ตลอดเวลาด้วย vector diagram สำหรับ salient-pole synchronous generator แสดงดังรูป (2.4)



Vector diagram of salient-pole synchronous machine ($x'_q = x_q$). Voltage vectors E , E_{qd} , and E' all lie on the quadrature axis, both in the transient state and in the steady state.

รูปที่ 2.4

2.7 Application of synchronous Machine Theory to Transient Stability Studies.

นับตั้งแต่เกิด disturbance ขึ้น ช่วงเวลาของ mechanical oscillation ของ synchronous machine กินเวลาประมาณ 1 วินาที ส่วนค่า subtransient time constant ของ synchronous มีค่าประมาณ 0.03 ถึง 0.04 วินาที สำหรับค่า armature time constant สำหรับกรณี short circuit ที่ armature terminal มีค่าประมาณ 0.1 ถึง 0.3 วินาที ดังนั้นค่า subtransient component และค่า d.c. component ของ armature current สามารถตัดทิ้งได้ (ในภาควิเคราะห์ transient stability)

ค่า transient time constant มีค่า 0.5 ถึง 10 วินาที โดยประมาณ
ดังนั้นในการวิเคราะห์ transient stability นั้นจำเป็นต้องคำนึงถึง transient
component ของ armature current ซึ่งกระทำให้หลายวิธีแตกต่างกันไปแล้วแต่ความ
ละเอียดและข้อสมมุติในการคำนวณที่ต้องการ โดยสามารถเรียงลำดับตามความละเอียดที่ต้อ
งการได้ดังนี้

2.7.1 Salient-pole machine

- 1). สมมุติว่า voltage behind direct-axis transient reactance E_1' คงที่ (ดูรูป 2.5)
- 2). สมมุติว่าในช่วง transient-period ค่า flux linkage ของ field winding คงที่ (E_q' คงที่)
- 3). คำนึงถึงการลดลงของ flux linkage ของ field winding (E' แปรเปลี่ยนได้)

2.7.2 Round rotor machine

- 1). สมมุติว่า voltage behind direct-axis transient reactance E_1' คงที่
- 2). สมมุติว่าค่า flux linkage ของ rotor circuit ทั้งแนว direct-axis และ quadrature-axis คงที่ (E_q' และ E_d' คงที่)
- 3). สมมุติว่า flux linkage ของ rotor circuit ในแนว direct-axis มีการลดลง (E' เปลี่ยนแปลง) ส่วน quadrature-axis rotor circuit สมมุติว่าวงจรเปิด ($E_d^q = 0$)
- 4). คำนึงถึงการลดลงของ flux linkage ของ rotor circuit ทั้งในแนว direct-axis และ quadrature axis

2.8 Power-angle curve of salient pole machine

2.8.1 Steady state power-angle curve of salient pole generator.

ค่า electric power output ของ salient pole generator ในช่วง steady state สามารถแสดงในรูปของ terminal voltage V , excitation voltage E_q และมุม δ ระหว่าง V กับ E_q ได้ดังนี้

จากสมการ (2.61)

$$I_d = \frac{-V_d r + (E_q - V_q) X_q}{r^2 + X_d X_q} \quad (2.90)$$

จากสมการ (2.61)

$$I_q = \frac{(E_q - V_q) r + V_d X_d}{r^2 + X_d X_q} \quad (2.91)$$

ค่า Power output คือ

$$P = V_d I_d + V_q I_q \quad (2.92)$$

แทนค่า I_d จากสมการ (2.90) และ I_q จากสมการ (2.91) ลงในสมการ (2.92) จะได้

$$P = \frac{V_d (-V_d r + E_q X_q - V_q X_q) + V_q (E_q r - V_q r + V_d X_d)}{r^2 + X_d X_q}$$

$$= \frac{E_q (V_q r + V_d X_q) - (V_d^2 + V_q^2) r + V_d V_q (X_d - X_q)}{r^2 + X_d X_q} \quad (2.93)$$

เนื่องจากว่า $V_q = V \cos \delta$ และ $V_d = V \sin \delta$ (2.94)

$$V^2 = V_d^2 + V_q^2 \quad (2.95)$$

$$V_d V_q = V^2 \cos \delta \sin \delta = \frac{1}{2} V^2 \sin 2\delta \quad (2.96)$$

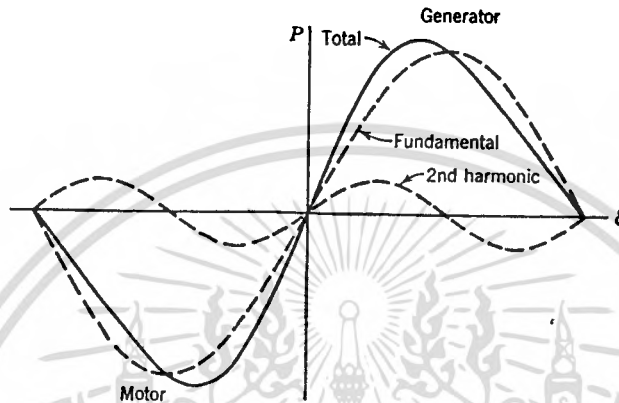
แทนค่าสมการ (2.93), (2.94) และ (2.95) ลงใน (2.92)

$$P = \frac{E_q V (r \cos \delta + X_q \sin \delta) - V^2 r + \frac{1}{2} V^2 (X_d - X_q) \sin 2\delta}{r^2 + X_d X_q} \quad (2.97)$$

ถ้าหากค่า r มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า reactance สมการ (2.97) จะเป็น

$$P = \frac{E_q V}{X_d} \sin \delta + \frac{V^2 (X_d - X_q) \sin 2\delta}{2X_d X_q} \quad (2.98)$$

จากสมการที่ (2.98) จะเห็น electrical power output P จะประกอบด้วย พจน์ของ sine wave และ second harmonic ซึ่งเกิดจากผลของ saliency เรียกว่า reluctance power. ถ้านำสมการ (2.98) ไป plot จะได้ดังรูป (2.5)



Steady-state power-angle curve of salient-pole synchronous machine.

รูปที่ 2.5

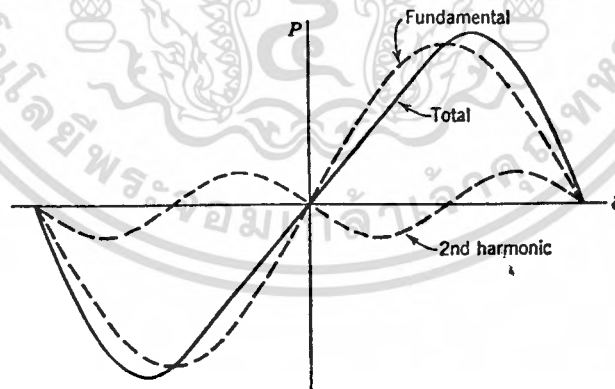
จากรูป (2.5) จะเห็นได้ว่า reluctance power ทำให้ curve มีลักษณะชันเข้าหา บริเวณ stable region

2.8.2 Transient power angle curve of salient-pole synchronous machine

ในช่วง transient period ค่าของ electrical power output equation จะมีลักษณะคล้ายกับในกรณี steady state เพียงแต่แทนค่า E_q ด้วย E'_q และ X_d ด้วย X'_d

$$P = \frac{E'_q V}{X'_d} \sin \delta - \frac{V^2 (X_q - X'_d)}{2X'_d X_q} \sin 2\delta \quad (2.99)$$

เมื่อนำสมการ (2.99) ไป plot จะได้ลักษณะดังรูป (2.6)



Transient power-angle curve of salient-pole synchronous machine.

รูป 2.6

เนื่องจากค่า $x_{\theta} > x'_{\theta}$ ทำให้ second harmonic term ในช่วง transient period มีเครื่องหมายกลับกันกับ second harmonic term ในช่วง steady state ดังนั้น power-angle curve ในช่วง transient period จะเบนออกจาก stable region.



SWING EQUATION AND STEP-BY-STEP METHOD

3.1 บทนำ

การวิเคราะห์ถึง transient stability ของระบบไฟฟ้ากำลังใด ๆ นั้น ส่วนหนึ่ง จะมีความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางคานกลศาสตร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าในระบบนั้น ทั้งนี้เพราะ หลังจากเกิด disturbance เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวจะต้องปรับค่าระยะขั้วเชิงมุมของ rotor เพื่อให้การส่งจ่ายกำลังของระบบมีค่าสอดคล้องกัน ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการปรับตัวของ rotor ทางคานกลศาสตร์มีได้เท่าเทียมกับทางไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ทางคานกลศาสตร์จะมีความเกี่ยวข้องกับค่า moment inertia ของตัว rotor กับ prime mover ที่ใช้ขับเคลื่อน rotor โดยตรง

3.2 Swing Equation

ในการหาค่าระยะขั้วเชิงมุมของ rotor ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่าง ๆ นั้นทำได้ โดยนำกฎของวัตถุหมุนใด ๆ มาประยุกต์ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

$$T = I \cdot \alpha = I \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (3.2.1)$$

โดยที่ : I = moment of inertia (กิโลกรัม - เมตร²)
 α = ความเร่งเชิงมุม (rad/sec²)

สำหรับค่า T เป็นผลรวมทางพีชคณิตของแรงบิด (torque) ทั้งหมดที่กระทำต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยแยกออกได้เป็น 2 ส่วน

- T_m = shaft torque ซึ่งรวมผลของ mechanical losses ด้วย
- T_e = electromagnetic torque

ดังนั้น $T = T_m - T_e$ (3.2.2)

ที่สภาวะ steady state ผลต่างของแรงบิดมีค่าเป็นศูนย์ จึงไม่เกิดความเร่งขึ้นที่ตัว rotor แต่ในขณะที่เกิด disturbance เมื่อพิจารณาในกรณีของ transient stability ผลต่างของแรงบิดจะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดความเร่งหรือความหน่วงก็ขึ้นอยู่กับค่า T ว่ามีค่าเป็นบวกหรือลบตามลำดับ

ปัญหาของเราอยู่ที่การแก้สมการ (3.2.1) เพื่อหาค่าตำแหน่งเชิงมุม θ ของตัว rotor ที่เวลา t ต่าง ๆ เมื่อเทียบกับแกนที่อยู่กับที่ แต่เพื่อความสะดวกเราควรหาค่าตำแหน่งเชิงมุมของ rotor เทียบกับแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็ว synchronous โดยให้

$$\delta = \theta - \omega_0 t \quad (3.2.3)$$

โดยที่ : ω_0 = ความเร็ว synchronous rad/sec
 δ = ตำแหน่งเชิงมุมของ rotor เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็ว synchronous

ดังนั้น $\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$

เมื่อนำค่านี้และค่าในสมการ (3.2.2) แทนลงในสมการ (3.2.1)

$$T_m - T_e = I \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2}$$

เมื่อคูณด้วยความเร็วเชิงมุม ω ใด ๆ

$$P_m - P_e = M \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a \quad (3.2.4)$$

โดยที่ : M = $I\omega$ เป็นค่า momentum เชิงมุม
 P_m = WT_m เป็นค่า shaft power input
 P_e = WT_e เป็นค่า electrical power output เมื่อหักค่า-
การสูญเสียทางต้านไฟฟ้าแล้ว
 P_a = $P_m - P_e$ เป็นค่า accelerating power

สมการที่ (3.2.4) ถูกเรียกว่าเป็น swing equation ซึ่งสามารถใช้ได้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวในระบบ สำหรับการวิเคราะห์ที่คงกล่าวข้างต้น

สำหรับค่า M โดยปกติจะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับ ω ที่เปลี่ยนแปลงตามลักษณะการ swing ของ rotor แต่ในทางปฏิบัติการเปลี่ยนแปลงของ ω ก่อนเกิด lost synchronism เมื่อเทียบกับ ω_0 แล้วมีค่าน้อยมาก ดังนั้นในการแก้สมการ swing equation จะถือว่า M มีค่าคงที่

ค่าคอมที่ไ้จากสมการ swing equation ไ้แก่ค่า δ ที่เป็น function ของเวลา t เมื่อนำไปเขียนเป็น graph จะถูกเรียกว่าเป็น swing curve จากการตรวจสอบ swing curves ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า synchronous ทุกตัวในระบบ จะสามารถบอกได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใดในระบบที่ยังคงสภาวะ synchronism ไว้ได้ หลังจากเกิด disturbance ซึ่งสามารถดูรายละเอียดพร้อมทั้งตัวอย่างที่ทดสอบจากระบบ multimachine ได้ในบทที่ 6

3.3 Step-by-Step Method

จากสมการที่ (3.2.4) เมื่อวิเคราะห์ในลักษณะของระบบ multimachine ค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ส่งจ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวในระบบ จะมีค่าขึ้นอยู่กับตำแหน่งเชิงมุมและการเปลี่ยนความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวในระบบ ดังนั้นสำหรับระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า n ตัว จะประกอบด้วยสมการ differential สมการดังนี้

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{mi} - P_{ei}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_i, \dots, \delta_n, \frac{d\delta_1}{dt}, \frac{d\delta_2}{dt}, \dots, \frac{d\delta_i}{dt}, \dots, \frac{d\delta_n}{dt}) ; i = 1, 2, \dots, m \quad (3.3.1)$$

สมการ (3.3.1) มีลักษณะเป็น nonlinear nonhomogeneous differential ซึ่งไม่สามารถแก้สมการด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ธรรมดา ต้องอาศัยวิธีการทาง numerical integration โดยคิดเป็นแบบ step-by-step

วิธีการของ step-by-step มีความยืดหยุ่นเหมาะสำหรับใช้แก้สมการ swing equation มาก เพราะเราสามารถเลือกใช้วิธีการทาง numerical สำหรับแก้สมการ differential เพื่อให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ transient stability ซึ่งต้องการคำตอบที่มีความถูกต้องสูงและมีวิธีการคำนวณที่ง่าย

การนำเอาวิธีการของ step-by-step มาประยุกต์ใช้แก้สมการ swing equation โดยปกติแล้วจะสมมุติให้ P_a มีค่าคงที่ในแต่ละช่วงเวลา Δt และมีค่าไม่เท่ากันสำหรับช่วงเวลาที่ย่างกัน จากข้อสมมุตินี้ทำให้สมการที่ (3.3.1) กลายเป็น linear differential equation สำหรับในช่วงเวลาของการ step จึงสามารถแก้สมการด้วยวิธีการของ numerical ที่เหมาะสม เมื่อรู้คำตอบที่ได้จากการแก้สมการและค่า δ และ w ที่จุดเริ่มต้นของช่วงเวลาจะสามารถคำนวณค่า δ และ w ที่จุดปลายของช่วงเวลานั้น สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวได้ก่อนที่จะทำการคำนวณในลักษณะเดียวกันนี้ สำหรับช่วงเวลาถัดไปจำเป็นต้องหาค่า P_a ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับช่วงเวลานั้นก่อน โดยที่ P_{mi} จะสมมุติให้คงที่เมื่อไม่คำนึงผลของ turbine governor แต่ P_{ei} มีค่าไม่คงที่โดยหาได้จากการแก้สมการของ network ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ถ้าคำนึงถึงผลของ damping ก็จะเป็น power output อีกส่วนหนึ่งที่ขึ้นอยู่กับความเร็วเชิงมุมสัมพันธ์ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัว ซึ่งจะมีผลทำให้ขนาดของการ swing ลดลงและเข้าสู่จุดใดจุดหนึ่งถ้าการ swing ในรอบแรกไม่ lost synchronism

จากเหตุผลที่กล่าวมาสรุปได้ว่า การแก้สมการ swing equation โดยวิธีการของ step-by-step ประกอบด้วยขั้นตอนการใหญ่ ๆ 2 ขั้นตอนที่ต้องทำสลับกันไป ดังนี้

อย่างแรกเป็นการหาค่าตำแหน่งเชิงมุม และความเร็วเชิงมุมที่จุดปลายของช่วงเวลา Δt จากค่าตำแหน่งเชิงมุมและความเร็วเชิงมุมที่จุดต้นของช่วงเวลานั้น และค่า P_a สำหรับช่วงเวลานั้น

อย่างที่สอง เป็นการหาค่า P_a ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว จากค่าตำแหน่งเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวในระบบ โดยหาได้จาก การแก้สมการ network ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหล่านั้นตั้งอยู่สำหรับรายละเอียดจะยกไปกล่าวไว้ในบทที่ 4

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการทาง numerical ที่ใช้ในขั้นตอนแรกโดยจะยกให้ดู 2 วิธีด้วยกัน

3.3.1 Modified-Euler Method

เป็นวิธีที่ปรับปรุงมาจาก Euler's method โดยทำการหาค่าเฉลี่ยของความชันที่จุดต้นและจุดปลายของช่วงเวลา ก่อนที่จะทำการหาค่า δ และ w ที่จุดปลายของช่วงเวลานั้น ซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับ Taylor's series อันดับที่ 2 ที่กระจายรอบจุด δ และ w ทำให้ค่าตอบถูกต้องมากขึ้น โดยมีวิธีการคำนวณที่ไม่ยุ่งยากนักและมี cpu time ค่า

3.3.2 Runge-Kutta Method

เป็นวิธีการที่ทำในลักษณะเดียวกับ Modified-Euler method คำนวณตรงที่ค่าของ δ และ w ได้จากการกระจายของ Taylor's series อันดับที่ 4 ทำให้ได้ค่าตอบที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก แต่มีวิธีการที่ซับซ้อนขึ้นและมี cpu time สูงกว่าวิธีแรก

SOLUTION OF NETWORKS

4.1 บทนำ

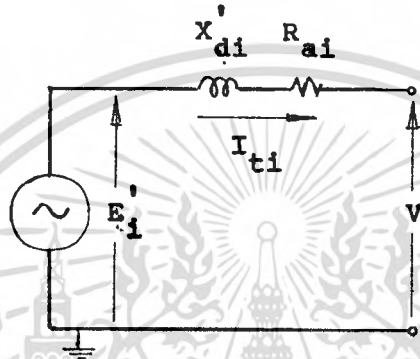
การหา swing curves สำหรับระบบ multimachine ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ประกอบด้วย 2 ขบวนการที่ต้องทำสลับกันไป อย่างแรกเป็นการแก้สมการ swing equation ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวซึ่งจะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเชิงมุมในช่วงสั้น ๆ ของเวลาจากค่า P_a สำหรับช่วงนั้น ๆ อย่างที่สองเป็นการหาค่า P_a สำหรับช่วงเวลาถัดไป เมื่อรู้ค่าตำแหน่งเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวที่ได้จากขบวนการแรก โดยหาได้จาก การแก้สมการของ network ขบวนการแรกได้กล่าวไว้อย่างละเอียดในบทที่ 3 สำหรับขบวนการที่ 2 นั้นเมื่อระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้การแก้สมการของ network มีความสำคัญมากขึ้น ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของระบบและวิธีการแก้สมการ โดยคัดส่วนที่ไม่มีผลต่อการหา swing curve ออกเพื่อทำให้วิธีการคำนวณไม่ยุ่งยากและมี cpu time ต่ำ

4.2 Network Representation.

เป็นการกล่าวถึง impedance diagram ขององค์ประกอบในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความสัมพันธ์ต่อการวิเคราะห์ transient stability ซึ่งมีความจำเป็นมากสำหรับการสร้าง network equation ลักษณะของ impedance diagram จะมีค่าเฉพาะ positive-sequence เพราะ fault ที่ใช้ทดสอบเป็นแบบ three-phase fault

อันดับแรกเป็นการกล่าวถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า synchronous ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญต่อความมีเสถียรภาพของระบบมากที่สุด โดยทั่วไปจะถูกแทนด้วยค่า direct-axis transient reactance x'_d ต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายกำลังงานที่มีขนาดของความ

ค่าคงที่ ดังรูปที่ 1 สำหรับค่าความต้านทานของขดลวด armature จะไม่คำนึงถึงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใหญ่ ๆ สำหรับรายละเอียดของค่า x'_{di} และผลต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า synchronous ที่มีต่อ transient-stability ของระบบ ได้กล่าวไว้ในย่อหน้า 3



รูปที่ 1 เป็นแบบจำลองทาง network ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า synchronous สำหรับการศึกษา transient-stability

จากรูปที่ 1 V_i คือค่าความต่างศักย์ของ bus ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ส่วนค่า E'_i หาได้จากสูตร

$$E'_i = V_i + R_{ai} I_{ti} + jX'_{di} I_{ti} \quad (4.2.1)$$

$i = 1, 2, \dots, m$

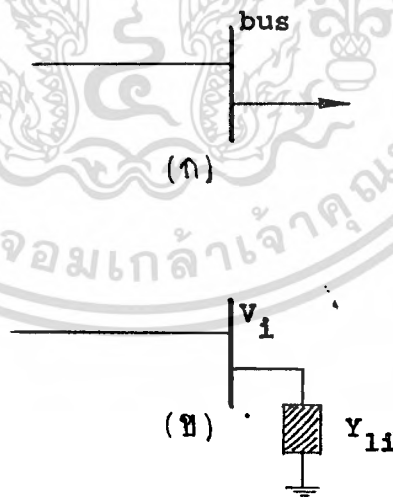
โดยที่ m เป็นจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับระบบ multimachine
 I_{ti} เป็นกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ

องค์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งได้แก่ load ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับเวลาในแต่ละวัน ในแต่ละปี และปีต่อปี และผลอื่น ๆ ดังนั้นในการศึกษาจำเป็นต้องเลือกใช้ load เฉพาะค่าใดค่าหนึ่งหรือมากกว่า เพื่อให้ได้การออกแบบระบบป้องกันที่มีประสิทธิภาพ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่นไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงและประหยัด โดยปกติจะเลือกใช้ load ที่ประมาณไว้ในอนาคต (load forecasting) ซึ่งค่า load นี้จะเป็นตัวกำหนดขีดความสามารถ (capacity) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า และการทำงานของระบบในอนาคต เนื่องจากวงจรของ load มีลักษณะเป็นกลุ่ม (lumped circuit) โดยต่อแยกมาจากสถานีส่งจ่ายกำลังหลัก (stations) และสถานีส่งจ่ายกำลังย่อย (substations) ดังนั้นเราจึงแทน load ด้วยค่า vector power $P_{1i} + jQ_{1i}$ ดังในรูป 2. (ก) ในขณะที่เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ จะถือว่า load แต่ละตัวมีค่าคงที่ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยค่า static admittance Y_{1i} ดังสมการ

$$Y_{1i} = \frac{(P_{1i} - jQ_{1i})}{V_1^2} \quad (4.2.2)$$

โดยที่ V_1 เป็นความต่างศักย์ของ bus ที่ load ต่ออยู่โดยคิดเทียบกับจุดอ้างอิงที่เป็น ground ซึ่งหาได้จากค่าตอบของ load-flow ของระบบก่อนเกิดความผิดปกติ



รูปที่ 2. (ก) แสดงสัญลักษณ์ของ load ที่อยู่ที่ bus
(ข) impedance diagram ของ load เทียบกับ ground

สำหรับองค์ประกอบอื่น ๆ สามารถแทนได้ด้วย positive-sequence impedance ที่สภาวะปกติอย่างเช่น หม้อแปลงไฟจะแทนด้วยค่า series impedance โดยไม่คำนึงถึงค่า exciting impedance เนื่องจาก fault ที่เกิดมีลักษณะสมมาตรกันทั้ง 3 phase

4.3 Faults Representation

เนื่องจากว่าค่ากำลังงานที่ส่งออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวขณะเกิดความผิดปกติ ถูกกำหนดโดยความรุนแรงและตำแหน่งที่เกิดของความผิดปกติ ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าจุกวิฤกษ์ของเวลาสำหรับการกำจัดความผิดปกติ (circuit clearing time) ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพสำหรับทุกเงื่อนไข (reliability) การออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องทดสอบกับสิ่งผิดปกติที่รุนแรงที่สุดในตำแหน่งที่มีโอกาสเกิดการสูญเสียเสถียรภาพไ้มากที่สุด (weak point) ลักษณะของสิ่งผิดปกติที่รุนแรงได้แก่ fault ชนิดต่าง ๆ ดังนี้

1. Single line-to-ground fault
2. Line-to-line fault
3. Double line-to-ground fault
4. Three-phase fault

สำหรับ single line-to-ground fault เกิดขึ้นบ่อยครั้ง ส่วน three-phase fault มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก แต่มีความรุนแรงที่สุด ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ three-phase fault สำหรับการทดสอบ

4.4 Network performance equation

ก่อนที่จะหาค่าคอมของ network จำเป็นต้องสร้างสมการแสดงการทำงานของระบบไฟฟ้าในช่วงเวลา transient ซึ่งลักษณะของสมการสามารถนำเอาสมการที่ใช้กับ load-flow มาประยุกต์ใช้ดังนี้

จากวิธีการของ node analysis จะได้ว่า

$$I_{BUS} = Y_{BUS} \cdot V_{BUS} \quad (4.4.1)$$

โดยที่ Y_{BUS} เป็นค่า bus admittance matrix โดยใช้ ground เป็นแกนอ้างอิง มีขนาดเท่ากับ $n \times n$ เมื่อ n เป็นจำนวน bus ของระบบ

V_{BUS} เป็น column matrix ของความตางศักย์ของ bus โดยคิดเทียบกับ ground

I_{BUS} เป็นค่าของกระแสที่มีทิศทางเข้า bus จากจุดอ้างอิงซึ่งได้มาจากแหล่งจ่ายกระแส (current source) 2 ส่วน ดังนี้

1. กระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า synchronous ซึ่งถูกสมมุติให้เป็นแหล่งกำเนิดงานทางอุดมคติ หาได้จากสมการ

$$I_{ti} = \frac{(P_{ti} - jQ_{ti})}{V_i}$$

2. กระแสที่เกิดจาก load หาได้จาก

$$I_{li} = \frac{(P_{li} - jQ_{li})}{V_i}$$

ค่าคอมที่ไต่ไปทำการ modified ระบบ และที่สำคัญที่สุดก็คือจะต้องหาค่าเริ่มต้นอันใดแก่ค่าขนาดและมุมของความต่างศักย์ภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว กับค่ากำลังงานทางกลศาสตร์ P_{mi} ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ก่อนที่จะทำการหา swing curve โดยมีรายละเอียดดังนี้

เริ่มแรกหากระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวจากสมการ

$$I_{ti} = \frac{P_{ti} - j Q_{ti}}{V_{ti}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.5.1)$$

โดยที่ P_{ti} และ Q_{ti} เป็นค่ากำลังงานจริงและกำลังงานเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ V_{ti} คือค่าความต่างศักย์ของ bus ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ซึ่งค่าทั้งหมดได้มาจากค่าคอมของ load-flow

เมื่อเราแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า synchronous ด้วยวงจรดังรูปที่ 1 ค่าของความต่างศักย์ภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหาได้สมการที่ (4.2.1)

$$E'_i(0) = e_i(0) + j f_i(0)$$

ค่าของมุมเริ่มต้นของ $E'_i(0)$ หาได้จากสมการ

$$\delta_{i(0)} = \tan^{-1} \frac{f_i(0)}{e_i(0)}$$

สำหรับค่ากำลังงานกลศาสตร์เริ่มต้น $P_{mi(0)}$ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ P_{ei} ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าใน air-gap แต่เมื่อไม่คำนึงถึงความต้านทาน armature ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะได้ว่า

$$P_{mi(0)} = P_{ti}$$

ค่า $(P_{t1} + jQ_{t1})$ และ $(P_{11} + jQ_{11})$ จะแทนค่ากำลังงานทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ load ตามลำดับ

เมื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วขณะหลังจากเกิด fault ของระบบไฟฟ้ากำลัง เราจะแทนภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในรูป static admittance โดยหาได้จากสมการที่ (4.2.2) ทำให้ I_{11} มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสมาชิกของ Y_{BUS} ในแนว diagonal จะรวมค่า static admittance เข้าไปด้วยดังสมการ

$$Y'_{11} = Y_{11} + Y_{11}$$

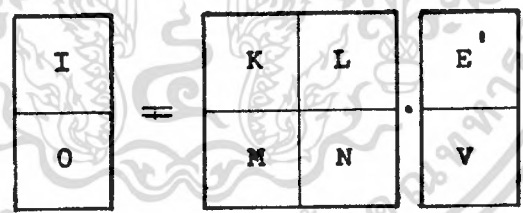
ส่วน I_{BUS} ที่มีภาระทางไฟฟ้าต่ออยู่จะเป็นศูนย์ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยวงจรดังรูปที่ 1 ซึ่งถ้าพิจารณาในรูปของ Thevenin' source จะทำให้มี bus เพิ่มขึ้นโดยมีจำนวนเป็น $n + m$ ดังนั้นจำนวนสมาชิกของ Y_{BUS} -matrixs จึงเพิ่มขึ้นเนื่องจากต้องรวมผลของค่า $R_{a1} + jX'_{d1}$ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว โดยมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น $(n+m) \times (n+m)$ สำหรับ I_{BUS} ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่จะมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนที่ bus ใหม่หาได้จากสมการ

$$I_{t1} = \frac{(E'_1 - V_1)}{jX'_{d1}} \tag{4.4.2}$$

การรวมค่าของ static admittance และ impedance ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับสมาชิกของ Y_{BUS} -matrix ดังกล่าวข้างต้นเรียกว่าการ modified network ซึ่งสามารถสร้างสมการใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} I_{t1} \\ I_{t2} \\ \vdots \\ I_{tm} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & \dots & 0 & B_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_{22} & \dots & 0 & 0 & 0 & B_{23} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_{mm} & 0 & \dots & 0 & \dots & B_{mn} \\ B_{11} & 0 & \dots & 0 & C_{11} & C_{12} & \dots & \dots & C_{1n} \\ 0 & 0 & & 0 & C_{21} & C_{22} & \dots & \dots & C_{2n} \\ 0 & B_{32} & \dots & 0 & \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & B_{nm} & C_{n1} & C_{n2} & \dots & \dots & C_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_1 \\ \vdots \\ E_m \\ V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (4.4.3)$$

จากสมการที่ (4.4.3) สามารถแบ่งสมาชิกของ matrix ออกเป็น matrix ย่อย ๆ ได้ 4 ส่วน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงรูปแบบสมการของระบบไฟฟ้ากำลังหลังจากทำการ modified แล้ว

โดยที่ [K] มีลักษณะเป็น diagonal matrix มีขนาดเป็น m x m โดยที่

$$A_{ii} = \frac{1}{R_{ai} + j X_{di}}$$

[L] เป็น matrix ที่มีขนาด $m \times n$ โดยที่สมาชิกในแต่ละแถวจะมีเพียงค่าเดียว คือ $B_{ij} = \frac{-1}{R_{ai} + jX'_{di}}$

ค่า j จะเป็นตัวบอกตำแหน่งที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ i ท่ออยู่

[M] มีลักษณะเป็น transposition ของ matrix [L] โดยมีขนาดเป็น $n \times m$

[N] เป็น matrix ที่มีลักษณะเดียวกับ Y_{BUS} -matrix โดยมีสมาชิกทุกตัวเหมือนกัน ยกเว้นสมาชิกที่อยู่ในแนว diagonal ซึ่งจะมีค่าของ static admittance และค่า admittance ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารวมอยู่ด้วย

ดังนั้นสมการที่ (4.4.2) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & L \\ L^T & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E' \\ V \end{bmatrix} \quad (4.4.4)$$

4.5 Solution techniques

ขั้นตอนเริ่มแรกสำหรับการศึกษาลักษณะของระบบคือการคำนวณหาค่าความต่างศักย์และค่ากำลังงานที่ bus ต่าง ๆ ของระบบก่อนเกิด fault โดยใช้วิธีการคำนวณของ load-flow ซึ่ง load flow ที่ใช้จะต้องให้ค่าทอมที่มีความถูกต้องสูง เพราะต้องนำ

หลังจากที่เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบอันเนื่องมาจากสายส่งขาดหรือเกิดการลัดวงจร ทำให้วงจรเปลี่ยนรูปร่าง ซึ่งจะมีผลทำให้ P_{ei} ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวเปลี่ยนแปลง ถ้าไม่คำนึงถึงผลของ saliency กับการเปลี่ยนแปลงของ flux linkages ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่า P_{ei} สามารถหาได้จากสมการ

$$P_{ei} = \text{Re} \left[I_{ti} \cdot E_i' \right] \quad (4.5.2)$$

ซึ่งค่าของกระแส I_{ti} หาได้จากการแก้สมการที่ (4.4.4) ส่วนค่า E_i' เป็นความต่างศักย์ภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยมีขนาดคงที่ สำหรับมุม δ_i หาได้จากการแก้สมการ swing equation ดังได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3

การหากระแส I_{ti} ถ้าคิดจากสมการที่ (4.4.2) จำเป็นต้องหา V_i ของ bus ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ ซึ่งถ้าใช้วิธีการของ Gauss seidel iterative เราต้องหาความต่างศักย์ที่ทุก ๆ bus สำหรับการคำนวณในแต่ละ step ทำให้เสียเวลา computer time โดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นเราจะกำจัด bus ที่ไม่จำเป็นออกโดยใช้วิธีของ partition matrix พิจารณาสมการที่ (4.4.4) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$[I] = [K][E] + [L][V] \quad (4.5.3)$$

$$[O] = [L][E] + [N][V] \quad (4.5.4)$$

จากสมการ (4.5.4) คูณด้วย inversion ของ matrix $[N]$

$$[V] = -[N]^{-1} \cdot [L]^T \cdot [E] \quad (4.5.5)$$

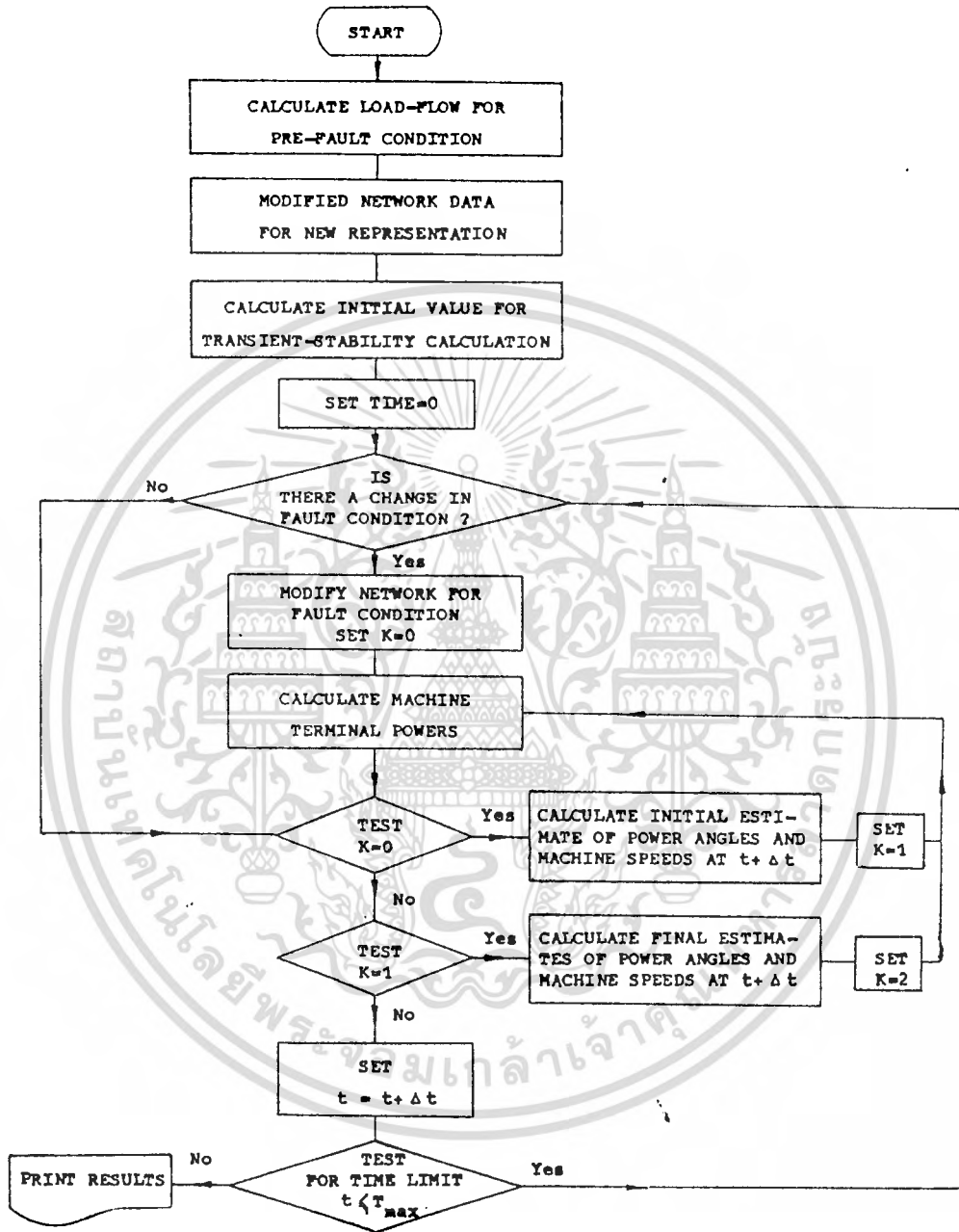
แทนค่า $[v]$ ในสมการที่ (4.5.3) ด้วยสมการ (4.5.5) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} [I] &= [A] \cdot [E'] \\ [A] &= ([K] - [L][N]^{-1}[L]^T) \end{aligned} \quad (4.5.6)$$

โดยที่ $[A]$ เป็น matrix ที่แสดงค่า admittance ของระบบหลังจากการกำจัด bus ที่ไม่จำเป็นออกมีขนาดเป็น $m \times m$

จากสมการที่ (4.5.6) จะเห็นว่าเมื่อเราหา $[N]^{-1}$ ได้ก็จะสามารถหากระแส I_{ti} ได้โดยง่าย แต่มีเงื่อนไขอยู่อย่างหนึ่งคือ จะต้องหาค่าของ matrix $[A]$ ใหม่ทุกครั้ง ที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการทำงาน

จากข้อมูลดังกล่าวมาทั้งหมดสามารถที่จะสรุปขั้นตอนการหา swing curves ของ ระบบ multimachine ได้ดังแสดงใน flow-chart รูปที่ 4



รูปที่ 4 Transient calculation using the modified Euler method

CONVERSION OF TRANSIENT STABILITY PROBLEM TO EQUIVALENT SYSTEM EMPLOYING AN INFINITE BUS

5.1 บทนำ

ในการศึกษาเรื่อง transient stability ระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่างที่ประกอบด้วยเครื่องจักร synchronous 2 เครื่อง นิยมใช้เป็นตัวอย่างสาธิตการคำนวณ swing curves และ electrical clearing angle อย่างกว้างขวาง โดยที่ก่อนการคำนวณระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าวจะถูกแปลงเป็นระบบไฟฟ้ากำลังใหม่ที่ประกอบด้วยเครื่องจักร synchronous 1 เครื่องและ infinite bus 1 bus ในบทนี้จะได้อธิบายถึงวิธีการแปลงระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วยเครื่องจักร synchronous n เครื่องให้เป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วยเครื่องจักร synchronous n-1 เครื่อง, และ infinite bus 1 bus ตลอดจนวิธีการคำนวณ swing curve ของระบบไฟฟ้าที่ได้

5.2 Two Finite Machine

พิจารณาถึง swing equation ของเครื่องจักร synchronous ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วยเครื่องจักร synchronous 2 เครื่อง

$$\ddot{\delta}_1 = \frac{P_{a1}}{M_1} = \frac{P_{m1} - P_{e1}}{M_1} \quad (5.2.1)$$

$$\ddot{\delta}_2 = \frac{P_{a2}}{M_2} = \frac{P_{m2} - P_{e2}}{M_2} \quad (5.2.2)$$

เมื่อ

δ = deviation angle

$\ddot{\delta}$ = second derivative of δ with respect to t

M = inertia constant

P_m = input shaft power

P_e = output electric power

มุม deviation angle ของเครื่องจักร synchronous เครื่องที่ 1
เทียบกับ deviation angle เครื่องที่ 2 คือ

$$\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2 \quad (5.2.3)$$

ถ้าเรา differentiate สมการ (5.2.3) เทียบกับเวลา t จะได้

$$\dot{\delta}_{12} = \dot{\delta}_1 - \dot{\delta}_2 \quad (5.2.4)$$

แทนค่า $\dot{\delta}_1$ และ $\dot{\delta}_2$ จากสมการ (5.2.1) และ (5.2.2) ลงในสมการ (5.2.4)
จะได้ว่า

$$\ddot{\delta}_{12} = \frac{P_{a1}}{M_1} - \frac{P_{a2}}{M_2} \quad (5.2.5)$$

คูณสมการ (5.2.5) ด้วยค่า $M_1 M_2 / (M_1 + M_2)$ จะได้

$$\begin{aligned} \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)} \cdot \ddot{\delta}_{12} &= \frac{M_2 P_{a1} - M_1 P_{a2}}{M_1 + M_2} \\ &= \frac{M_2 P_{m1} - M_1 P_{m2}}{M_1 + M_2} - \frac{M_2 P_{e1} - M_1 P_{e2}}{M_1 + M_2} \quad (5.2.6) \end{aligned}$$