



รายงานวิทยานิพนธ์ I ระดับปริญญาโท

(ชื่อเรื่อง) การแสดงแบบจำลองของระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงและสมการของ
D.C. JACOBIAN MATRIX
THE REPRESENTATION OF HVDC MODEL & D.C.
JACOBIAN MATRIX EQUATIONS

(ชื่อนักศึกษา) นายประณต บุญไชยอภิสิทธิ์ เลขประจำตัว 27.0004
ภาควิชา ไฟฟ้ากำลัง

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. คร. โกศล เพ็ชรสุวรรณ
อ. สมโภชน์ ประไพ

ภาคการศึกษา 1 ปีการศึกษา 2527

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

การแสดงผลจำลองของระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงและสมการของ D.C. JACOBIAN MATRIX

THE REPRESENTATION OF HVDC MODEL & D.C. JACOBIAN MATRIX EQUATIONS,

ประณต	บุญไชยอภิสิทธิ์ *	คณะวิศวกรรมศาสตร์
สมโภชน์	ประไพ **	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ดร. โภทศ	เพชรสุวรรณ **	วิทยาเขตจตุรพักตรพิมาน

บทคัดย่อ

ระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมีความสำคัญอย่างมากต่อระบบไฟฟ้าแรงสูงขนาดใหญ่ ซึ่งมีการเชื่อมต่อระหว่างระบบย่อย ๆ โดยทำให้ระบบมีเสถียรภาพและความเชื่อถือที่ดีวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แสดงแบบจำลองของระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง และสมการของ D.C. JACOBIAN MATRIX ซึ่งมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับ DECOUPLE PRINCIPLE เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า

ABSTRACT

The High Voltage Direct Current (HVDC) is very importance for large high voltage system in which there are interconnections between sub systems. Especially it improves system stability and reliability. The HVDC model and the D.C. Jacobian matrix equations which suitable with the Decouple principle are represented in this thesis.

* นักศึกษา

** อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ในอดีตระบบไฟฟ้ากระแสตรงถูกใช้ในกรณีของโพลชนิดพิเศษ ได้แก่ โพลถนน โรงภาพยนตร์ ขณะเดียวกันระบบไฟฟ้ากระแสสลับมีความสำคัญและเหมาะสม เนื่องจากความสามารรถในการควบคุมแรงดันและพลังงานในระดับต่าง ๆ กัน โดยอาศัยคุณสมบัติของอุปกรณ์จำพวก หม้อแปลงไฟฟ้า คาปาซิเตอร์ รีแอคเตอร์ และอื่น ๆ นอกจากนี้โพลซึ่งใช้กับระบบไฟฟ้ากระแสสลับสร้างได้ง่าย สามารถควบคุมให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในปัจจุบันความต้องการทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ระบบไฟฟ้าได้พัฒนาจากการผลิตในลักษณะของระบบอิสระย่อย ๆ มาเป็นการผลิตในรูปของโครงข่าย (net work) ระบบมีขนาดใหญ่ (large system) ผลิตไฟฟ้าระดับแรงดันสูงมีการเชื่อมกันระหว่างระบบอิสระย่อย ๆ (interconnection system) จากลักษณะดังกล่าว ระบบไฟฟ้ากระแสตรงมีความเหมาะสมในหลาย ๆ ด้านคือ

1. การเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีความถี่ต่างกันโดยใช้ระบบไฟฟ้ากระแสตรง (HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT LINKS; HVDC LINKS) เนื่องจาก HVDC LINKS มีลักษณะเป็น ASYNCHRONOUS LINK จึงสามารถแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมการไหลของพลังงานได้
2. ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับสายส่งซึ่งมีความยาวมาก ๆ ผลของ charging current มีมาก แต่ระบบไฟฟ้ากระแสตรงมีผลน้อยจึงสามารถส่งได้ในระยะทางที่ไกลกว่า
3. ในกรณีของระบบไฟฟ้ากระแสตรงที่ระดับแรงดันเดียวกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (the peak value of the equivalent voltage) ผลของ corona loss มีค่าน้อยกว่า ผลของ corona loss จะรบกวนต่อระบบโทรคมนาคมอย่างรุนแรง
4. ผลของ fault มีค่าต่ำกว่าระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

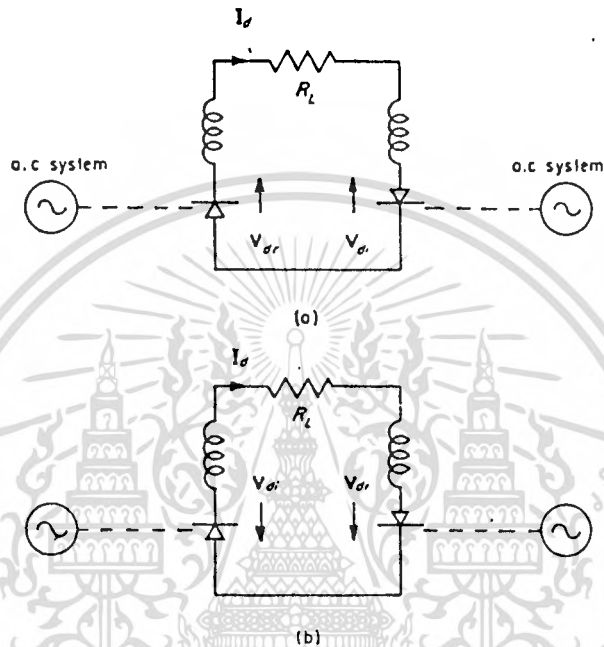
จากความเหมาะสมของระบบไฟฟ้ากระแสตรง จึงทำให้เกิดระบบไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรง และระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ความซับซ้อนของระบบเพิ่มขึ้น

ในการวิเคราะห์การไหลของพลังงานและสถานะของระบบไฟฟ้ากำลัง (Alternating current and Direct Current Power System Load Flow Analysis) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอแบบจำลองซึ่งเป็นการเลียนแบบ (simulation) ของระบบไฟฟ้ากระแสตรง และสมการทางคณิตศาสตร์ มีความสอดคล้องกับ DÉCOUPLE PRINCIPLE โดยสามารถเชื่อมเข้ากับแบบจำลองและสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ



2. ทฤษฎี

ในระบบไฟฟ้ากำลัง รูปที่ 2.1 ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 2 ระบบ ถูกเชื่อมต่อโดยระบบไฟฟ้ากระแสตรง (HVDC LINK) ซึ่งประกอบด้วยส่วน Rectification (V_{dr}) และส่วน Inversion (V_{di})

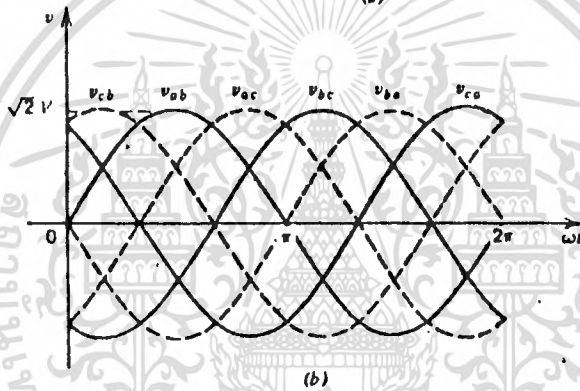
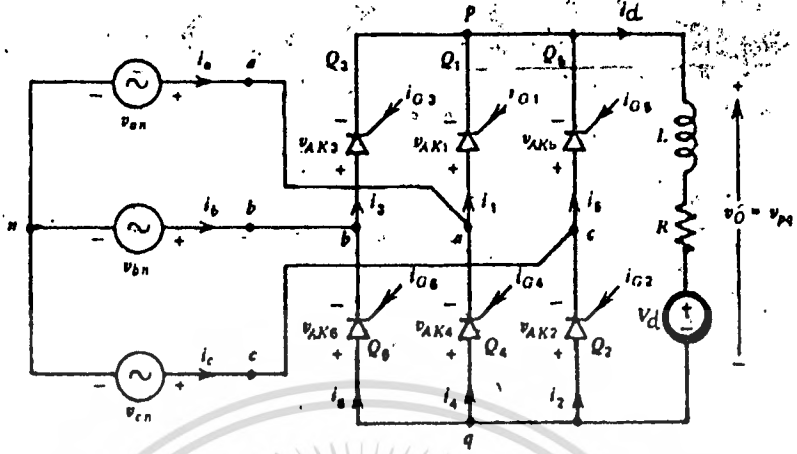


(a) Symbolic representation of two alternating current systems connected by a direct-current link, V_{dr} = direct voltage across rectifier, V_{di} = direct voltage across inverter.
 (b) System as in (a) but power flow reversed.

รูปที่ 2.1

2.1 Rectification Unit

Rectification Unit คือ ส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับลักษณะของ Three-phase full-wave controlled rectifier circuit ใดแสดงในรูป 2.2 (a) รูป 2.2(b) แสดง line-to-line voltage waveform



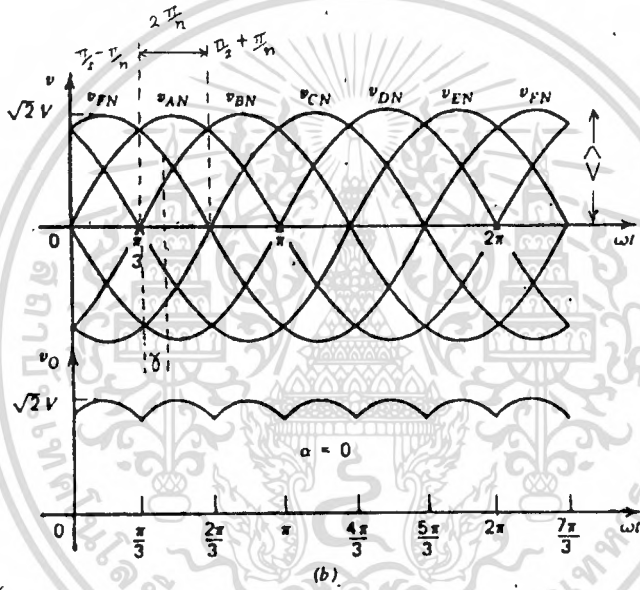
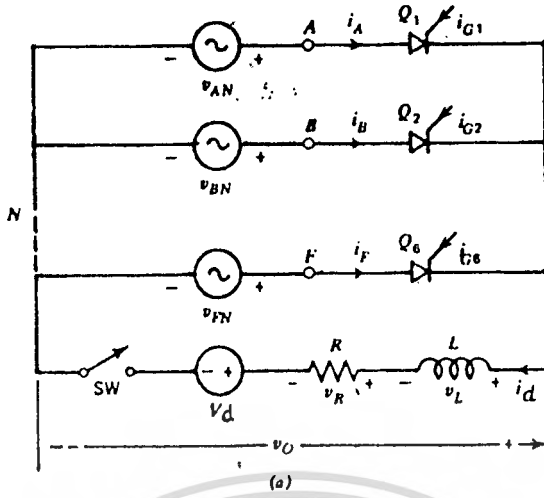
Three-phase full-wave controlled rectifier.

รูปที่ 2.2

รูป 2.3 (a) แสดง Equivalent circuit รูป 2.2 (a) รูป 2.3(b) แสดง line - to - neutral voltage waveform และ voltage ที่ถูก rectified เมื่อพิจารณา รูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 เขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง actual circuit (รูปที่ 2.2) และ equivalent circuit (รูปที่ 2.3) ได้คือ

$$V_{AN} = v_{ab} = \sqrt{2} V \sin \omega t \quad V \quad (2.1.1.)$$

$$V_{BN} = \sqrt{2} V \sin (\omega t - \pi/3) V$$



Equivalent circuit for the converter of 2.2.

รูปที่ 2.3

$$\begin{aligned}
 V_{CN} &= \sqrt{2} \text{ v sin (wt - } 2\pi /3) \text{ v} \\
 V_{DN} &= \sqrt{2} \text{ v sin (wt - } \pi) \text{ v} \\
 V_{EN} &= \sqrt{2} \text{ v sin (wt - } 4\pi/3) \text{ v}
 \end{aligned}$$

$$V_{FN} = \sqrt{2} V \sin (wt - 5\pi / 3) V \quad (2.1.2)$$

การนำกระแสของ Thyristor ใดแสดงใน ตารางที่ 1

Interval	Actual Circuit		Equivalent Circuit	
	Voltage Applied to Load	Thyristors Conducting	Voltage Applied to Load	Thyristor Conducting
$\pi/3 < \omega t < 2\pi/3$	V_{ab}	Q_6, Q_1	V_{AN}	Q_1
$2\pi/3 < \omega t < \pi$	V_{ac}	Q_1, Q_2	V_{BN}	Q_2
$\pi < \omega t < 4\pi/3$	V_{bc}	Q_2, Q_3	V_{CN}	Q_3
$4\pi/3 < \omega t < 5\pi/3$	V_{ba}	Q_3, Q_4	V_{DN}	Q_4
$5\pi/3 < \omega t < 2\pi$	V_{ca}	Q_4, Q_5	V_{EN}	Q_5
$2\pi < \omega t < 7\pi/3$	V_{cb}	Q_5, Q_6	V_{FN}	Q_6

ตารางที่ 1

เมื่อใช้ Fourier series วิเคราะห์รูป 2.3 พบว่า

the output voltage

$$V_o = \frac{1}{2\pi/n} \int_{\pi/2 - \pi/n}^{\pi/2 + \pi/n} \hat{V} \sin wt \, d(wt)$$

$$= \frac{\hat{V} \sin(\pi/n)}{\pi/n} \quad (2.1.3)$$

ในกรณี 3 phase*

$$V_o = \frac{\hat{V} \sin 60^\circ}{\pi/3}$$

$$= \frac{\hat{V} 3 \sqrt{3}}{2\pi} = 0.83 \hat{V}$$

* half - wave rectifier

เมื่อพิจารณาผลของ delay angle (α)

$$\begin{aligned}
 v_o &= \frac{1}{2\pi/n} \int_{\pi/2 - \pi/n + \alpha}^{\pi/2 + \pi/n + \alpha} \hat{V} \sin \omega t \, d(\omega t) \\
 &= \frac{n\hat{V}}{2} \int_{\pi/n + \alpha}^{\pi/n + \alpha} \cos \omega t \, d(\omega t) \\
 &= \frac{n\hat{V}}{2} 2 \sin \left[\frac{\pi}{n} \right] \cos \alpha
 \end{aligned}$$

$$v_o = V_o \cos \alpha \quad (2.1.4)$$

(V_o ; maximum value of direct output voltage as defined by (2.1.3))

สำหรับกรณีของรูปที่ 2.3

$$\begin{aligned}
 v_o &= V_o \cos \alpha \\
 &= \frac{\hat{V} \cdot 3 \cdot \sqrt{3} \times 2}{2} \cos \alpha \\
 &= \sqrt{2} V_L \times \frac{3}{\pi} \cos \alpha \\
 &= K_1 V_L \cos \alpha \quad (2.1.5)
 \end{aligned}$$

$$\left(\hat{V} = \sqrt{2} V ; V_L = \sqrt{3} V ; K_1 = \frac{3 \sqrt{2}}{\pi} \right)$$

สมการของกระแสรูปที่ 2.3 (1)

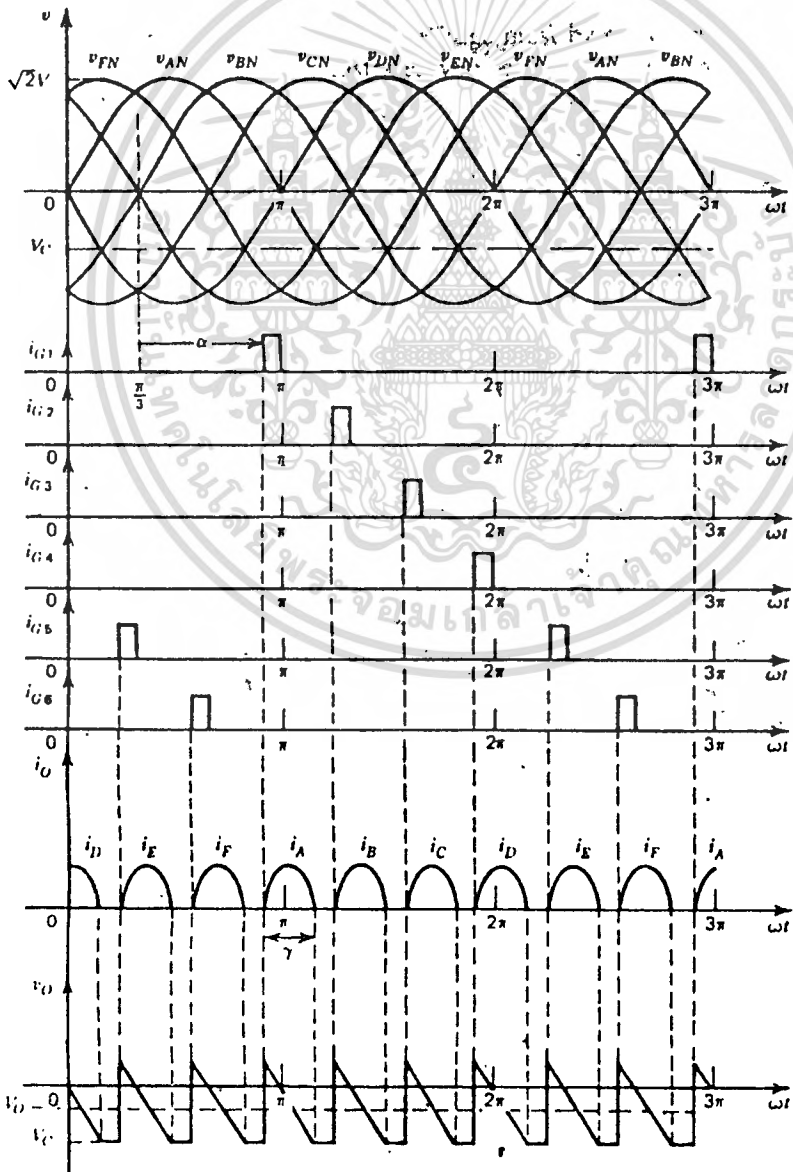
$$i_d = \frac{K_1 V_L \pi}{6x} [\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma)] \quad (2.1.6)$$

ผลจาก (2.1.5) และ (2.1.6)

$$v_d = K_1 V_L \cos \alpha - \frac{3 \times i_d}{\pi} \quad (2.1.7)$$

2.2 Inversion Unit

เมื่อพิจารณา Rectifier ที่ delay angle (α) มากกว่า $\pi/2$ จะเห็นว่าการทำงานในลักษณะตรงกันข้าม คือ converter จะรับพลังงาน และเปลี่ยนกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4

3. D.C link modul & D.C. equation

จากทฤษฎีในหัวข้อ 2 D.C. link mode ได้ถูกแสดงในรูปที่ 3.1 โดยจะเชื่อมต่อกันระหว่าง ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 2 ระบบ ประกอบไปด้วย rectifier, inverter, filter, two winding transformer (on-load tap changing), smoothing reactor และ d.c. trans mission impedance

Equivalence circuit ของรูปที่ 3.1 ได้แสดงในรูปที่ 3.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง parameter ของระบบไฟฟ้ากระแสสลับและระบบไฟฟ้ากระแสตรงคือ

ความสัมพันธ์ของ

AC/DC voltage

$$V_{dm} = K_1 E_m \cos \phi_m \quad (3.1)$$

$$V_{dn} = K_1 E_n \cos \phi_n \quad (3.2)$$

ความสัมพันธ์ของ

AC/DC current

$$I_m = K_1 I_d$$

$$I_n = K_1 I_d$$

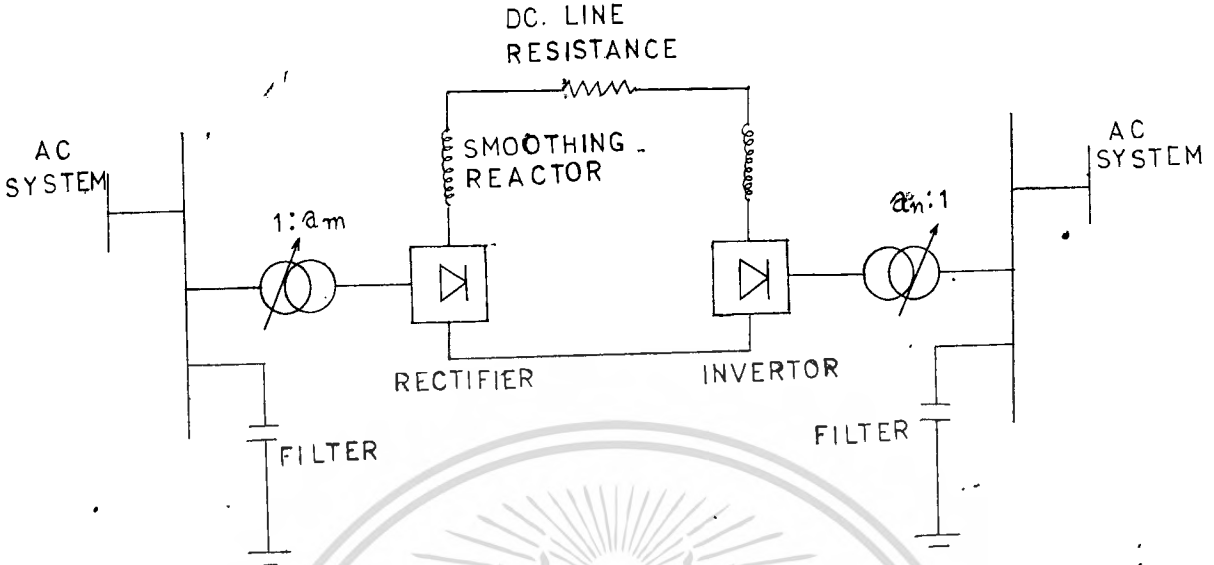
ในการวิเคราะห์ให้ AC current เป็น phase reference

และพิจารณาเฉพาะค่า transformer reactance สามารถเขียนสมการของ

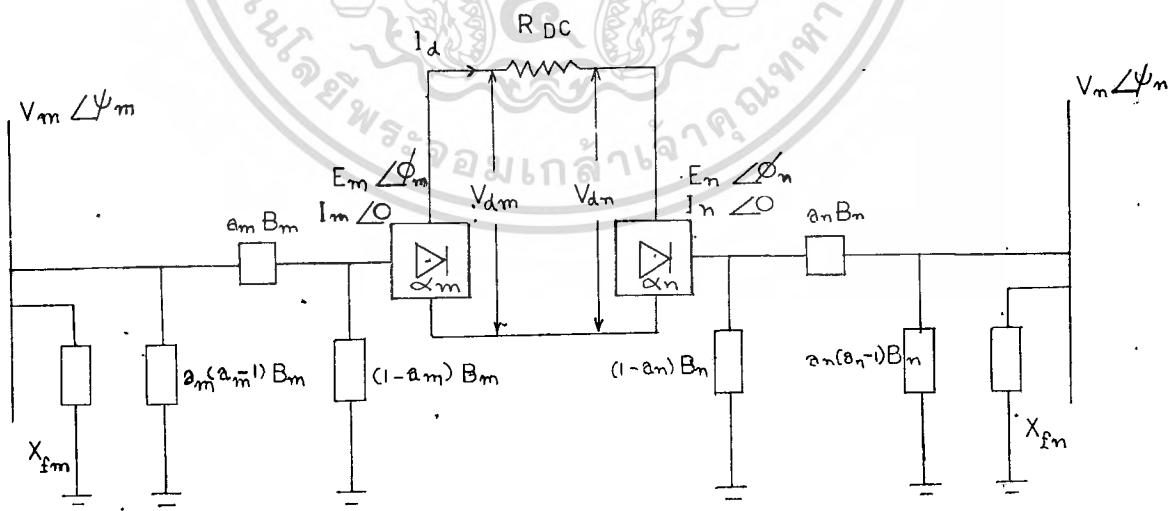
real และ imaginary component ของ rectifier current ได้คือ

$$K_1 I_d = B_m E_m \sin \phi_m - B_m a_m V_m \sin \psi_m \quad (3.3)$$

$$0 = E_m \cos \phi_m - K_1 a_m V_m \cos \psi_m$$



รูปที่ 3.1



รูปที่ 3.2

หรือ $0 = V_{dm} - K_1 a_m V_m \cos \psi_m$ (3.4)

ในทำนองเดียวกันสำหรับ inverter current

$$- K_1 I_d = B_n E_n \sin \phi_n - B_n a_n V_n \sin \psi_n \quad (3.5)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง DC current และ DC voltage คือ

$$V_{dm} = K_1 E_m \cos \alpha_m - K_2 X_m I_d \quad (3.7)$$

$$V_{dn} = K_1 E_n \cos \alpha_n - K_2 X_n I_d \quad (3.8)$$

$$V_{dm} - V_{dn} = R_{dc} I_d \quad (3.9)$$

(ความหมายของ symbol และการพิจารณา per unit system ใดแสดงใน APPENDIX I, II ตามลำดับ)

4. D.C. Jacobian matrix equations

จากสมการ (3.1) - (3.9) ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ (independent variables) 13 ตัว คือ $V_{dm}, V_{dn}, E_m, E_n, \phi_m, \phi_n, \alpha_m, \alpha_n, a_m, a_n, \psi_m, \psi_n, I_d$ ตัวแปรเหล่านี้จะแสดงสถานะของ d.c. link

เมื่อพิจารณาในรูปของ Newton - Raphson Algorithm จะเขียนได้ว่า

$$[R] = [A] \cdot [\Delta X] \text{ for } p \text{ equations} \quad (4.1)$$

โดยที่

R - the residuals for the non-linear equations representing the d.c. link power flow and control strategies.

A - are the first order differentials, $-\frac{\partial R_k}{\partial X_i}$,

for $k, i = 1, \dots, p$

ΔX - the variation of p variables

จากสมการ (3.1) - (3.9) เมื่อจัดใหม่ตามความเหมาะสม และรวม สมการควบคุม (control equations) จะได้ผลตามตารางที่ 2

โดยความหมายของ sp คือ Specified values สำหรับ กรณีในตารางที่ 2 เป็นลักษณะของการ control angles และ d.c. link voltage and power specified.

D.C. link R matrix with convertor control angles,
d.c. link voltage and power specified

D.C. Residual Equations	Variables	
$R_1 = V_{dm} - K_1 E_m \cos \phi_m$	E_m	
$R_2 = V_{dn} - K_1 E_n \cos \phi_n$	E_n	
$R_3 = K_1 I_d - B_m (E_m \sin \phi_m - a_m V_m \sin \psi_m)$	ϕ_m	
$R_4 = K_1 I_d + B_n (E_n \sin \phi_n - a_n V_n \sin \psi_n)$	ϕ_n	
$R_5 = V_{dm} - K_1 E_m \cos \alpha_m + K_2 X_m I_d$	V_{dm}	
$R_6 = V_{dn} - K_1 E_n \cos \alpha_n + K_2 X_n I_d$	V_{dn}	
$R_7 = V_{dm} - K_1 a_m V_m \cos \psi_m$	ψ_m	
$R_8 = V_{dn} - K_1 a_n V_n \cos \psi_n$	ψ_n	
$R_9 = V_{dm} + V_{dn} - R_{dc} I_d$	I_d	
$R_{10} = V_{dn}^{sp} - V_{dn}$	Control equations	
$R_{11} = \cos \alpha_m^{sp} - \cos \alpha_m$		$\cos \alpha_m$
$R_{12} = \cos \alpha_n^{sp} - \cos \alpha_n$		$\cos \alpha_n$
$R_{13} = P_{dm}^{sp} - V_{dm} I_d$		a_m
	a_n	

ตารางที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. AC/DC Jacobian matrix equations

พิจารณา AC/DC system จะเขียน AC/DC Jacobian matrix equations ได้โดยรวมผลของ DC Jacobian matrix equations จากหัวข้อที่ 4 เข้ากับ AC Jacobian matrix equations คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & D \\ J & L & E \\ B & C & A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta Q \\ \Delta v/v \\ \Delta X \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

จาก Decouple principle จะได้ sub matrix J, N เป็นศูนย์ sub matrix B, C, D และ E มี element ส่วนใหญ่เป็นศูนย์ส่วน sub matrix A คือ matrix A จาก สมการ (4.1) สิ่งที่ต้องเพิ่มเติมคือผลของ D.C. link ที่ต่อ bus bar ที่ต่ออยู่ซึ่งก็ได้แก่ diagonal element ของ sub matrix H, L เพราะฉะนั้นในกรณี D.C. link อยู่ระหว่าง bus m และ n จะได้

$$P_m = P_m(ac) + P_m(dc)$$

โดยที่
$$P_m(dc) = a_m B_m E_m V_m \sin(\psi_m - \theta_m) \quad (5.2)$$

จะเห็นว่า $P_m(dc)$ ไม่เป็น function ของ θ

$$\frac{\partial P_m/V_m}{\partial \theta_m} = \frac{\partial P_m(ac)/V_m}{\partial \theta_m}$$

$$\frac{\partial P_m / V_m}{\partial v_m} = \frac{\partial P_m (ac) / V_m}{\partial v_m} + \frac{\partial P_m (dc) / V_m}{\partial v_m}$$

จาก Decouple principle $\frac{\partial P_m (ac) / V_m}{\partial v_m} = 0$

$$\frac{\partial P_m (dc) / V_m}{\partial v_m} = a_m B_m E_m \sin(\psi_m - \phi_m) / V_m$$

ผลของ phase different ($\psi_m - \phi_m$) มีค่าน้อย สามารถตัดค่า
 $\frac{\partial P_m (dc) / V_m}{\partial v_m}$ หักได้ เพราะฉะนั้น sub matrix H จะไม่เปลี่ยนแปลง

แต่ในกรณีของ Sub matrix L

$$Q_m (dc) = a_m^2 B_m V_m^2 - a_m B_m V_m \cos(\psi_m - \phi_m) \quad (5.3)$$

จะเห็นว่า $Q_m (dc)$ เป็น function ของ V เพราะฉะนั้น จะต้องรวม
 ผลของ $Q_m (dc)$ ด้วยคือ

element L_{mm} จะต้องรวมผลของ $\frac{\partial Q_m (dc) / V_m}{\partial v_m}$

element L_{nn} จะต้องรวมผลของ $\frac{\partial Q_n (dc) / V_n}{\partial v_n}$

6. สรุป

ความสำคัญของระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่เพิ่มขึ้น ทำให้ระบบไฟฟ้ามีความซับซ้อนการทราบสถานะของระบบไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอแบบจำลอง และสมการซึ่งเป็นขั้นตอนแรกในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า โดยแบบจำลอง และสมการที่เสนอมีความเหมาะสมกับวิธี Fast Decouple Load Flow ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

หนังสืออ้างอิง

1. Weedy, B.M., Electric Power Systems; 2nd edition, 1972.
2. Dewan, S.B. and Stranghen, A., Power Semiconductor circuits.
3. Stott, B., "Review of load - flow calculation methods", IEEE Trens. Power App. Syst., vol. 62, No. 7, pp 916 - 929, July 1974.

APPENDIX ISymbols

V_d	-	direct voltage
I_d	-	direct current
E_m	-	alternating voltage
V_m	-	alternating voltage
I_m	-	alternating current
K_1	-	ratio of AC and DC per unit voltage and current
B	-	susceptance
a	-	transformer turns ratio
θ	-	voltage angle
α	-	firing angle

APPENDIX IIPer Unit System

$(P_{ac})_{base}$	=	PMW (3 Phase Power)
$(V_{ac})_{base}$	=	VKV line-to line
$(I_{ac})_{base}$	=	$(P / \sqrt{3}V) \times 10^3$ A
$(Z_{ac})_{base}$	=	$(1/\sqrt{3}) V / (I_{ac})_{base}$ ohms
$(I_{dc})_{base}$	=	$(\pi / \sqrt{6}) (I_{ac})_{base}$ A
$(I_{dc})_{base}$	=	$P / ((3 \sqrt{2} / \pi) \cdot (V_{ac})_{base}) \times 10^3$ A
$(V_{dc})_{base}$	=	$(3 \sqrt{2} / \pi) (V_{ac})_{base}$ kV
$(Z_{dc})_{base}$	=	$V_{dc} / (I_{dc})_{base}$
	=	$(18 / \pi^2) (Z_{ac})_{base}$