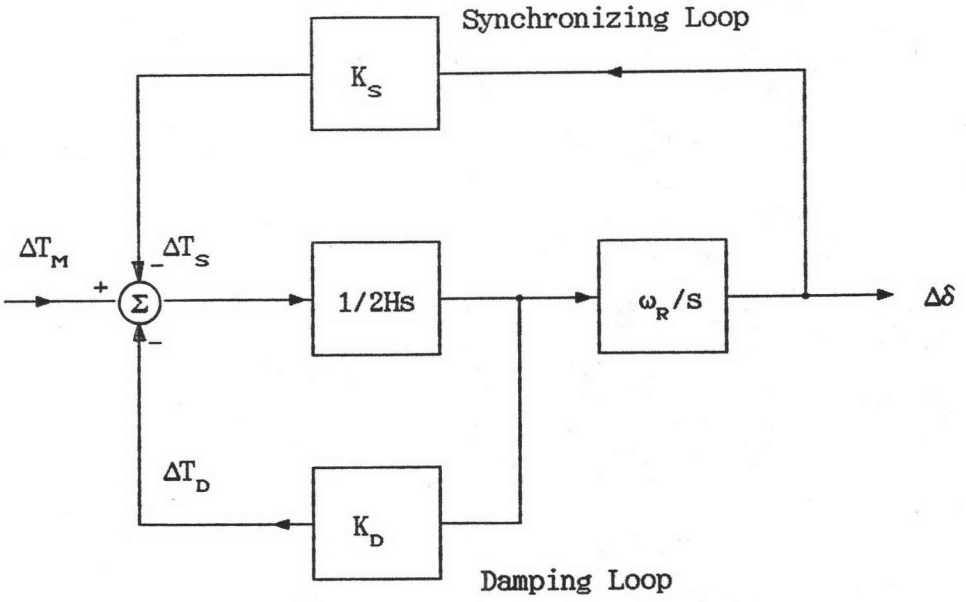
บทที่ 2

การหน่วงของระบบไฟฟ้ากำลัง

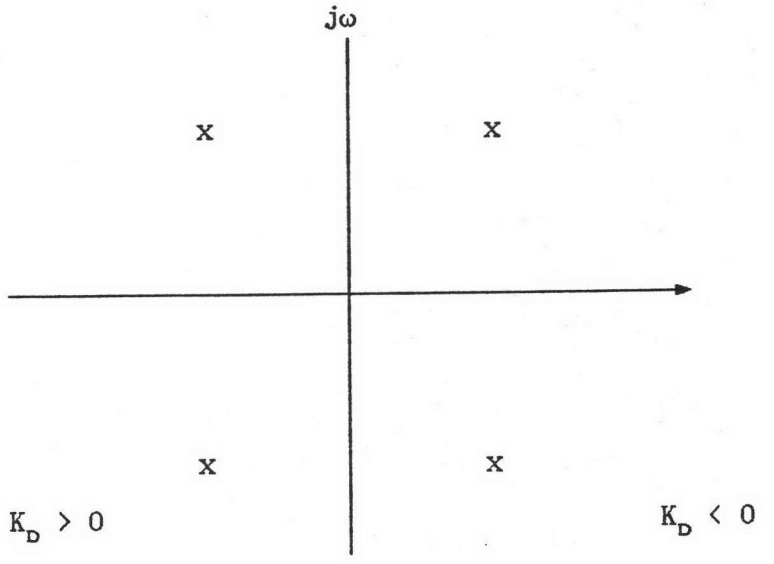
ออสซิลเลชันความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นเองในระบบไฟฟ้ากำลังมีสาเหตุมาจากออสซิลเลชันเชิง กล-ไฟฟ้า (electro-mechanical oscillations) ของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่าง ๆ ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวต้นเหตุของการเกิดออสซิลเลชันดังกล่าว[3] ตามปกติ เมื่อเกิดออสซิลเลชันขึ้น จะได้รับการหน่วงให้หายไปในที่สุด การหน่วงดังกล่าวเรียกว่าการหน่วงบวก (positive damping) อย่างไรก็ดี ในบางครั้งเมื่อเกิดออสซิลเลชันขึ้นมาแล้วความแรงของมันกลับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในกรณีเช่นนี้เรียกว่าเกิดการหน่วงลบ (negative damping)

ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ควบคุม ต่ออยู่ในระบบ จะมีการหน่วงที่จุดทำงานต่าง ๆ เป็นแบบการหน่วงบวกเสียเป็นส่วนมาก การหน่วงดังกล่าวเกิดจากตัวต้านทานของระบบไฟฟ้ากำลัง ขดลวดแดมเปอร์ (damper windings) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ผลจากการลบแม่เหล็ก (demagnetizing influence) ของอาร์มาเจอร์รีแอกชัน (armature reaction) โดยทั่วไป ผลตอบ (response) ของระบบไฟฟ้ากำลังต่อการรบกวนใด ๆ อยู่ในรูปของออสซิลเลชัน สำหรับความถี่ค่อนข้างสูงออสซิลเลชันดังกล่าว ได้รับการหน่วงโดยขดลวดแดมเปอร์ ที่ความถี่ต่ำ (0.1-0.7 เฮิร์ตซ์) ได้รับหน่วงด้วยอิทธิพลของทั้ง อาร์มาร์เจอร์รีแอกชัน และ ขดลวดแดมเปอร์ อุปกรณ์ควบคุมที่ติดตั้งเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อาจทำให้การหน่วงของออสซิลเลชันของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดีขึ้นหรือเลวลงก็ได้ ยกตัวอย่างเช่น ระบบควบคุมความเร็ว (speed governing system) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาจทำให้เกิดการหน่วงบวกถ้าออสซิลเลชันของโรเตอร์ มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ที่มันทำงาน แต่ อุปกรณ์ควบคุมแรงดัน (voltage regulator system) ทำให้การหน่วงของออสซิลเลชันที่ความถี่ต่ำเลวลง หรือบางครั้งอาจก่อให้เกิดการหน่วงแบบลบขึ้นได้ อย่างไรก็ตามถ้าติดตั้งอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ (power system stabilizer) ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจัดระบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ดังกล่าวกับอุปกรณ์ควบคุมแรงดันให้ดี จะช่วยทำให้การหน่วงที่ความถี่ต่ำของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นการหน่วงบวกได้[3],[4]



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรม ของสมการสวิง

$$R_{1,2} = -(K_D/4H) \pm j[(K_S\omega_R/2H) - (K_D/4H)^2]^{1/2}$$



รูปที่ 2.2 รากของสมการลักษณะสมบัติของสมการสวิง

ค่าคงตัว	คำอธิบาย
H	ค่าคงตัวแห่งความเฉื่อย (inertia constant) ของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบเปอร์ยูนิต (per unit)
ω_R	ความถี่เชิงไฟฟ้าระบุ (nominal electrical frequency) ของระบบไฟฟ้ากำลัง
K_S	สัมประสิทธิ์ของการซิงโครไนซ์ (synchronizing coefficient)
K_D	สัมประสิทธิ์ของการหน่วง (damping coeficient)

ตารางที่ 2.1 คำอธิบายของค่าคงตัวในรูปที่ 2.1

2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องเดียวต่ออยู่กับอินฟินิตบัส

ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องเดียวที่ต่ออยู่กับอินฟินิตบัส(infinite bus) ผ่านทางสายส่ง (transmission line) เป็นระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่ายซึ่งใช้ประกอบในการอธิบาย เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการหน่วงของออสซิลเลชันของระบบไฟฟ้ากำลังได้เป็นอย่างดี เนื่องจากสาเหตุของออสซิลเลชันของระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าวเกิดจากออสซิลเลชันของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า[3] ดังนั้น ในการวิเคราะห์การหน่วงของออสซิลเลชัน ของระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าว สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์การหน่วงของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมการสวิง (swing equation) ความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครีเมนตอล (incremental variable) ซึ่งเกิดจากการประมาณค่าสมการสวิงแบบเชิงเส้น ในรูปของบล็อกไดอะแกรม (block diagram) มีลักษณะตามที่แสดงในรูปที่ 2.1 [3] คำอธิบายสำหรับสัญญลักษณ์ต่าง ๆ ในรูปที่ 2.1 อยู่ในตารางที่ 2.1 สมการลักษณะสมบัติ (characteristic equation) ของสมการสวิงได้แสดงในสมการที่ 2.1

$$(2H/\omega_R)s^2 + (K_D/\omega_R)s + K_D = 0 \qquad (2.1)$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากของสมการลักษณะสมบัติมีค่าดังสมการ (2.2)

$$R_{1,2} = -(K_D/4H) \pm j[(K_S\omega_R/2H) - (K_D/4H)^2]^{1/2} \qquad (2.2)$$

ตามปกติค่าของ K_S มีค่าเป็นเลขบวก[3] ดังนั้นค่าของ K_D จึงเป็นตัวแสดงเสถียรภาพของมุมโรเตอร์ (rotor angle) รากของสมการลักษณะสมบัติสำหรับค่า K_D ทั้งที่เป็นบวกและลบ ได้แสดงในรูปที่ 2.2

2.1.1 สาเหตุของการหน่วงแบบลบ

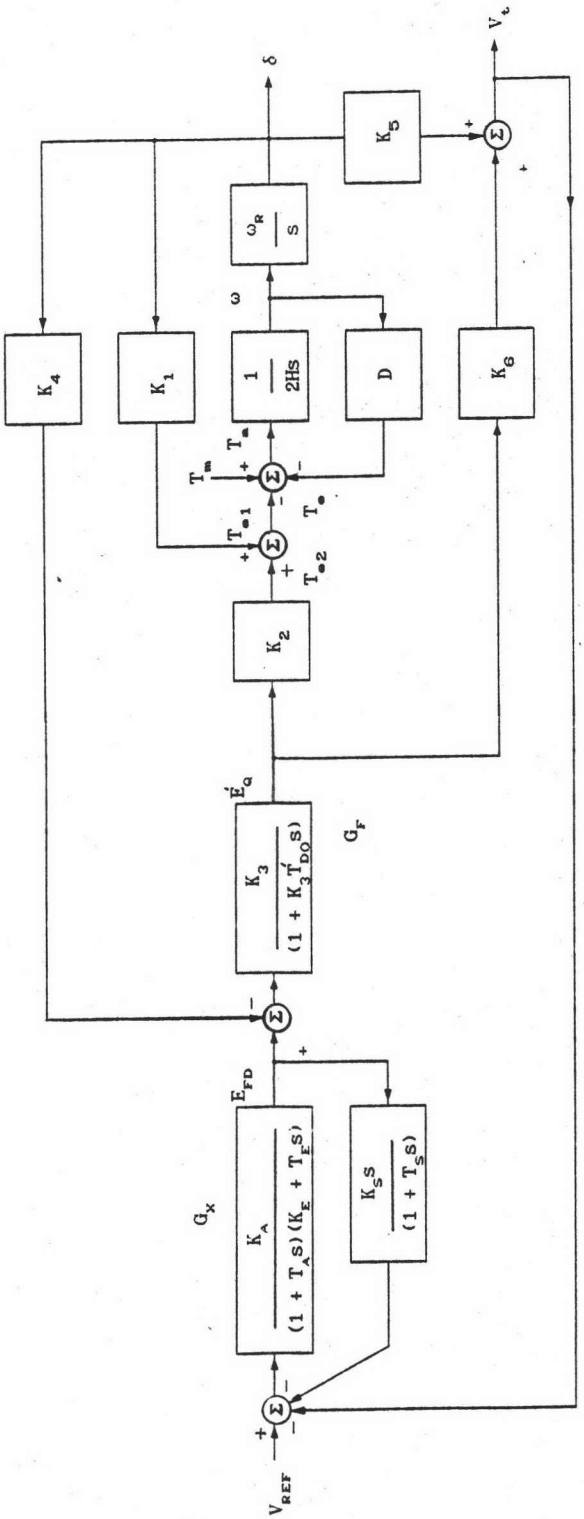
ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่มีระบบควบคุม ค่าของ K_D และ K_S จะเปลี่ยนไปตามจุดทำงาน (operating point) ถ้าค่าของ K_D มีค่าเป็นลบ มุมของโรเตอร์จะไม่มีเสถียรภาพ กล่าวคือถ้าเราพิจารณารากของสมการลักษณะสมบัติ (2.1) จะเห็นได้ว่าถ้าค่า K_D เป็นลบ รากของสมการลักษณะสมบัติ(2.2) จะมีส่วนจริง (real part) ที่เป็นเลขบวก

2.1.1.ก ผลของระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต่อการหน่วง

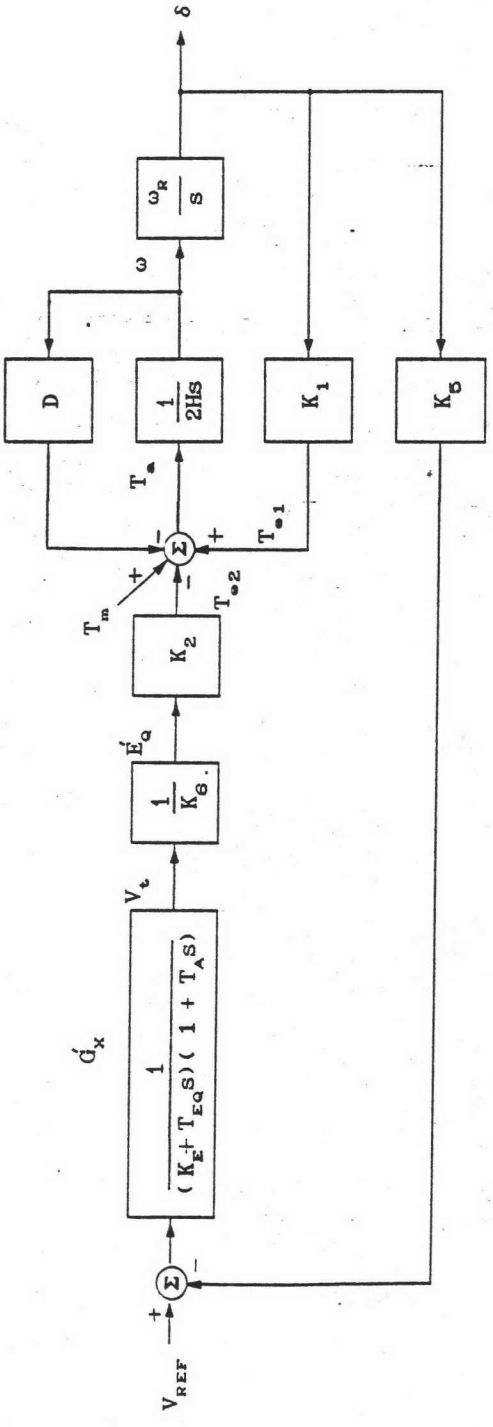
ที่ความถี่ต่ำมาก ๆ (ต่ำกว่า 0.1 เฮิร์ตซ์) ตัวควบคุมเทอร์ไบน์ (turbine controllers) มีส่วนทำให้ค่าของ K_D มีค่าเป็นลบ[3] ในภาวะปกติที่ความถี่ต่ำ (0.1 - 0.7 เฮิร์ตซ์) ระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีผลต่อการหน่วงของระบบไฟฟ้าน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของระบบเอกไซเตชัน (excitation system) ที่มีต่อการหน่วงดังกล่าว[6]

2.1.1.ข ผลของระบบเอกไซเตชันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต่อการหน่วง

ในกรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (automatic voltage regulator) เข้าไปในระบบเอกไซเตชันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครีเมนตอล ในส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบเอกไซเตชัน มีลักษณะตามที่ได้แสดง ในบล็อกไดอะแกรม ในรูปที่ 2.3[1] โดยที่ ค่าคงตัว D ในรูปคือสัมประสิทธิ์ของการหน่วง (dampimg coefficient) ของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าคงตัว K_1 - K_6 เป็นฟังก์ชันของ



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรม แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครีเมนตอลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับอินฟินิตบัส



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรม แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครีเมนตอลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับอินฟินิตบัส ซึ่งเกิดจากการลดรูป บล็อก ไดอะแกรม ในรูปที่ 2.3

อิมพีแดนซ์ (impedance) และตัวแปรของระบบไฟฟ้ากำลังที่จุดทำงาน ผลการโหลด (loading influence) ของระบบไฟฟ้ากำลัง มีอิทธิต่อค่าของ K_1 และ K_5 มากกว่าค่าคงตัวอื่น ๆ ตามปกติค่าคงตัว K_1 - K_6 มีค่าเป็นเลขบวก ยกเว้น K_5 มีค่าเป็นลบได้เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดเต็มที่หรือเกือบเต็มที่

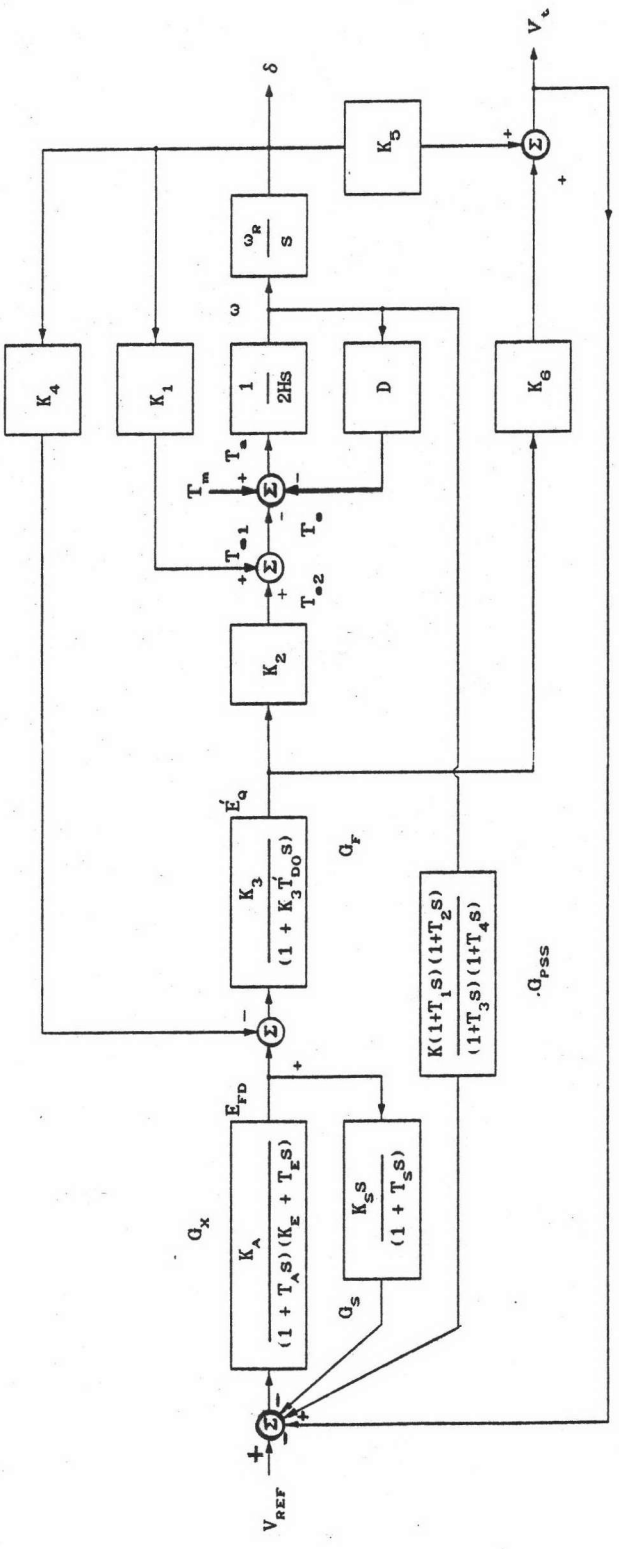
ที่ความถี่ต่ำ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (transfer function) G_s ในรูปที่ 2.3 มีค่าน้อยมากและสามารถตัดออกไปได้ และที่ความถี่ต่ำ เส้นทางป้อนกลับ (feedback path) ที่ผ่าน K_4 มีผลต่อการหน่วงน้อยมากจนสามารถตัดออกไปได้เช่นกัน[3] โดยใช้เหตุผลดังกล่าว บล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.3 สามารถลดรูปเป็นบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.4 ได้

ถ้าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน G_x มีค่าคงที่ เส้นทางป้อนกลับผ่าน K_5 คล้ายกลับเส้นทางป้อนกลับผ่าน K_1 ทำให้อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไม่มีผลต่อการหน่วงของออสซิลเลชันของโรเตอร์ แต่ที่จริงแล้ว G_x เป็นฟังก์ชันของความถี่ ดังนั้นมันจึงมีผลต่อการหน่วงของออสซิลเลชันของโรเตอร์

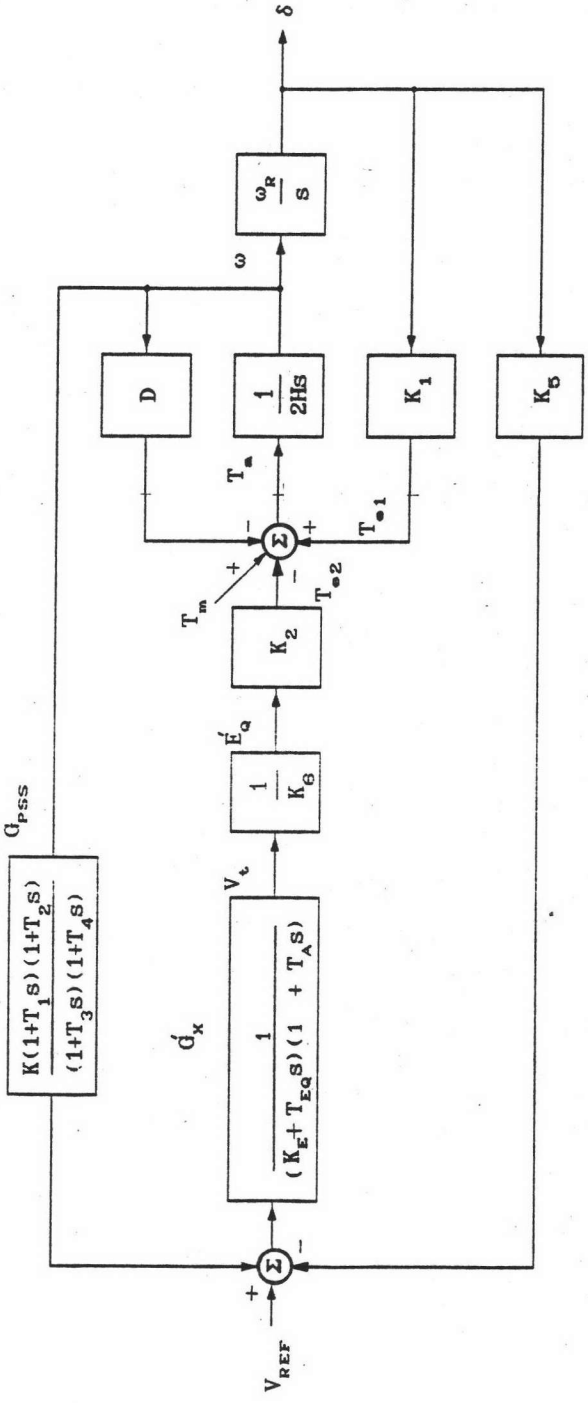
มุมโรเตอร์ δ มีเฟส (phase) ตามหลัง (lag) ความเร็วเชิงมุม ω หรือ $d\delta/dt$ อยู่ 90 องศา (degree) จากรูปที่ 2.4 เห็นได้ว่าถ้าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน G_x ทำให้เกิดเฟสตามหลังอีก 90 องศา ทำให้สัญญาณป้อนกลับจาก δ ที่ผ่าน K_5 ไปยังจุดรวมแรงบิด (torque summing point) มีเฟสตามหลัง ω อยู่ 180 องศา และมีผลต่อการหน่วงเช่นเดียวกับวงรอบหน่วง (damping loop) ที่ผ่าน D ถ้าค่าของ K_5 มีค่าเป็นลบ มีผลทำให้สัญญาณป้อนกลับที่ผ่าน K_5 ดังกล่าวมีเฟสเท่ากับเฟสของ ω และถ้าสัญญาณดังกล่าวมีค่ามากกว่าสัญญาณป้อนกลับที่ผ่าน D ทำให้เกิดการหน่วงลบเกิดขึ้น ค่าของ K_5 มีค่าเป็นลบถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดเต็มที่หรือเกือบเต็มที่

2.1.2 การสร้างสัญญาณเพื่อการหน่วงบวก

ถ้ากำลังงานเชิงกล (mechanical power) ซึ่งจ่ายให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับการควบคุมให้มีค่าคงที่ ออสซิลเลชันของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีสาเหตุมาจากออสซิลเลชันของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้าแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้รับการควบคุมให้เปลี่ยนแปลงให้เป็นสัดส่วนกับการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลทำให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนตามไปด้วย การกระทำดังกล่าวมีผลทำให้การหน่วงของออสซิลเลชันดีขึ้น ในทางปฏิบัติ การ



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครีเมนตอลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับอินฟินิตบัสในกรณีที่ติดตั้ง อุปกรณ์สเตบิไลเซอร์เข้ากับระบบเอกไซเตชันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครีเมนตอลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับอินฟินิตบัสในกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์เข้ากับระบบเอกไซเตชันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า