

## การประมาณค่าอิมพีแดนซ์และมุมเฟสแรงดันในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีตัวสังเกตการณ์แบบป้อนไปหน้า

### Transmission line impedance and Phase estimation in SMIB power system using Feed forward Observer

วันชัย ทรัพย์สิงห์ \*

#### บทคัดย่อ

การประมาณค่าอิมพีแดนซ์และมุมเฟสแรงดันในระบบส่งกำลังไฟฟ้า มีประโยชน์อย่างยิ่งในการอ้างอิงเพื่อจุดประสงค์ต่างๆ เช่น ประยุกต์ใช้ควบคุมการชดเชยกำลัง ไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Static VAr Control), การควบคุมแรงดันเครื่องกำเนิด (AVR) ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า เป็นต้น

ในบทความนี้นำเสนอแนวคิดการคำนวณประมาณค่าอิมพีแดนซ์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าพร้อมมุมเฟสด้วยวิธีตัวสังเกตการณ์ชนิดเกนสูงแบบป้อนไปหน้า (Feed forward High gain Observer) การวิเคราะห์ในบทความนี้ใช้ระบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวสังเกตการณ์ กับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวเชื่อมโยงกับระบบบัสอนันต์ (Single Machine Infinite Bus หรือ SMIB model) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าวิธีการตัวสังเกตการณ์ชนิดเกนสูงนี้ให้ผลคำนวณเข้าสู่เป้าหมาย (Converge) ได้ดี ผลตอบค่อนข้างแม่นยำ เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

**คำสำคัญ:** SMIB modeling, Line impedance and Phase estimation, Feed forward Observer

#### 1. บทนำ

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับบทความนี้เป็นแบบ Single Machine Infinite Bus model ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสามารถเขียนวงจรมูลยู่ได้ดังรูปที่ 2 โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำงานปกติที่ความเร็วเชิงโรตัส ( $\omega_0$ ) และสามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าได้ด้วยการควบคุมแรงดันขาออก ( $E_q$ ) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [1 - 3] ทั้งนี้การจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบ SMIB model ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์สามารถพิจารณาออกได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

##### สมการทางกล

$$\delta = \omega \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{2H}\omega + \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e) \quad (2)$$

ซึ่ง

- $\delta$  เป็นค่ามุมเฟสกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- $\omega$  เป็นความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะทำงาน
- $P_m$  เป็นกำลังงานกลขาเข้าของเครื่องกำเนิด
- $P_e$  เป็นกำลังงานไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิด
- $\omega_0$  เป็นความเร็วเชิงโรตัสของเครื่องกลไฟฟ้า :  
 $\omega_0 = 2\pi f_0$
- $D$  เป็นค่าคงที่ความหน่วงทางไฟฟ้าในรูป per unit
- $H$  เป็นค่าคงที่ความเฉื่อยทางกลในรูป per unit

\* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สมการทางไฟฟ้า

$$x_{ds} = x_T + x_L + x_d$$

$$x'_{ds} = x_T + x_L + x'_d$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T_{do}}(E_f - E_q) \quad (3)$$

$$E_q = \left( \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} \right) E'_q - \left( \frac{x_d - x'_d}{x'_{ds}} \right) V_s \cos \delta = x_{ad} I_f \quad (4)$$

$$P_e = I_q E_q = \left( \frac{V_s \sin \delta}{x_{ds}} \right) E_q \quad (5)$$

$$I_q = \frac{P_e}{x_{ad} I_f} = \frac{P_e}{E_q} \quad (6)$$

$$Q_e = \left( \frac{V_s \cos \delta}{x_{ds}} \right) E_q - \frac{V_s^2}{x_{ds}} \quad (7)$$

ซึ่ง

$E'_q$  เป็นแรงดันทรานเซียนซาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแกนตั้งฉาก (Quadrature axis)

$I_f$  เป็นกระแสกระตุ้นในวงจรขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$E_q$  เป็นแรงดันขั้วซาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$E_f$  เป็นแรงดันกระตุ้นในวงจรขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$T_{do}$  เป็นค่าเวลาคงที่ในแกนนอน (Direct axis) ขณะเกิดลัดวงจรชั่วขณะ

$I_q$  เป็นค่ากระแสซาออกในแกน Quadrature ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$Q_e$  เป็นค่ากำลังไฟฟ้รีแอกตีฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

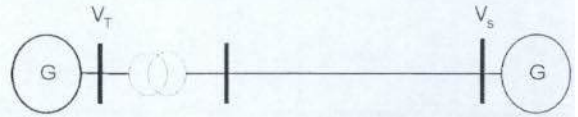
$V_s$  เป็นแรงดันที่บัสอนันต์

$x_d$  เป็นความเหนี่ยวนำในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

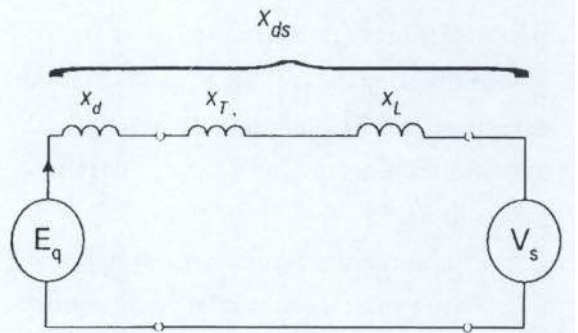
$x'_d$  เป็นความเหนี่ยวนำชั่วขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$x_s = x_T + x_L$ ;  $x_r$  เป็นความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า และ  $x'_L$  เป็นความเหนี่ยวนำของสายส่ง

$x_{ad}$  เป็นความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดกระตุ้นและขดลวด Stator ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 1 Schematic diagram ของ Single Machine Infinite Bus power system model



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1

ทั้งนี้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้าและมุมเฟสแรงดันในระบบอาจมีเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาขึ้นอยู่กับการทำงานของระบบส่งกำลังไฟฟ้านั้นๆ

โดยทั่วไปการคำนวณเพื่อประมาณค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้าอาจทำได้หลายวิธี เช่น Least square method เป็นต้น ซึ่งวิธี Feed forward Observer ที่ใช้ในบทความนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ไม่ซับซ้อนมากนักและสามารถประยุกต์ใช้ในเชิงปฏิบัติได้ ทั้งนี้การออกแบบ Observer นี้ตัวแปรต่างๆ ที่นำมาใช้ในการคำนวณจะต้องเป็นตัวแปรที่วัดค่าได้ในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตามจำนวนสมการที่ใช้ในการออกแบบ Observer ควรมีจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อไม่ให้เกิดความซับซ้อนในการคำนวณ เนื่องจากสมการที่ใช้เป็นแบบไม่เชิงเส้น (สมการ 1-7) ทั้งนี้ค่าเกณฑ์ขยายของ Observer ไม่จำเป็นต้องปรับแต่งค่าเกณฑ์ขยายอัตโนมัติ ซึ่งจะทำให้การคำนวณง่ายขึ้น

## 2. การประมาณค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง

ในการออกแบบ Observer สำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าในบทความนี้ สมการคณิตศาสตร์จำลองของระบบดังกล่าว (สมการ 1-7) จะถูกนำมาใช้ซึ่งจะเห็นว่า  $x_L$  เป็นค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการทราบซึ่งปะปนอยู่ในค่า  $x_{ds}$  และ  $x'_{ds}$  ทั้งนี้ตัวแปรบ่งบอกสถานะ (State Variable) ทุกตัวสามารถระบุและวัดค่าได้ยกเว้นค่า  $E_q$ ,  $E'_q$ ,  $I_q$  และ  $\delta$  จากสมการแรงดัน (4), จะได้สมการอนุพันธ์เป็น

$$\begin{aligned} \dot{E}_q &= \left( \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} \right) \cdot \frac{1}{T_{d0}} (E_f - E_q) + \left( \frac{x_d - x'_d}{x'_{ds}} \right) \omega V_s \sin \delta \\ &= \left( \frac{1}{T_{d0}} \right) \left( \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} \right) (E_f - E_q) + \left( \frac{x_d - x'_d}{x'_{ds}} \right) \left( \frac{P_e \omega}{x_{ad} I_f} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

ถ้า  $E_f = x_{ad} I_f$ , ดังนั้น

$$\begin{aligned} \dot{I}_f &= \left( \frac{1}{x_{ad} T_{d0}} \right) \left( \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} \right) (E_f - x_{ad} I_f) + \left( \frac{x_d - x'_d}{x'_{ds}} \right) \frac{P_e}{x_{ad} I_f} \omega \\ &= \left[ \left( \frac{1}{x_{ad} T_{d0}} \right) (E_f - x_{ad} I_f) + (x_d - x'_d) \frac{P_e}{x_{ad} I_f} \omega \right] \mu \end{aligned}$$

เมื่อ  $\mu = \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} \quad (9)$

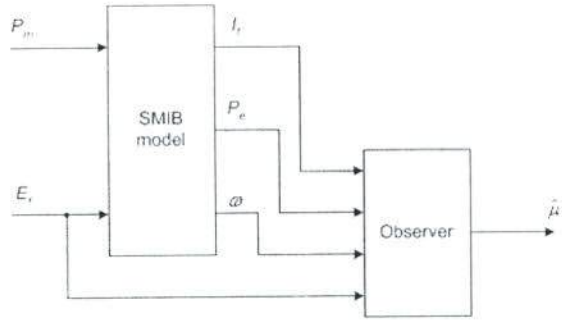
จากสมการจะเห็นได้ว่าเมื่อ  $\mu$  มีค่าคงที่ ซึ่ง  $\dot{\mu} = 0$  และค่า  $x_L$  สามารถหาได้จากค่าของ  $\mu$  ทั้งนี้ความสัมพันธ์ของสมการสามารถเขียน  $I_f$  และ  $\mu$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{I}_f &= \varphi(u, y) \mu \\ \dot{\mu} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

โดย

$$\varphi(u, y) = \left( \frac{1}{x_{ad} T_{d0}} \right) (E_f - x_{ad} I_f) + (x_d - x'_d) \frac{P_e}{x_{ad} I_f} \omega$$

เมื่อ  $u = E_f$  และ  $y = (I_f, P_e, \omega)^T$



รูปที่ 3 Schematic ของ Observer และระบบไฟฟ้า

สมการที่ (10) แสดงความสัมพันธ์ของสถานะซึ่งอ้างอิงจาก [4], ซึ่งตามสมมติฐานว่า State variable ทุกตัวอยู่ในขอบเขตที่ควบคุมได้ จะสามารถออกแบบ High gain Observer ได้ตาม [4] เพื่อคำนวณหา  $\mu$  ซึ่งจะทำให้ได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{\hat{I}}_f &= \varphi(u, y) \hat{\mu} - 2\theta (\hat{I}_f - I_f) \\ \dot{\hat{\mu}} &= -\frac{\theta^2}{\varphi(u, y)} (\hat{I}_f - I_f) \end{aligned} \quad (11)$$

$\hat{\mu}$  โดย  $\theta$  เป็นค่า tuning parameter ที่ถูกเลือกให้มีความสูงเพียงพอให้  $|\varphi(u, y)|$  และ  $\left| \frac{d}{dt} \varphi(u, y) \right|$  อยู่ในขอบเขตที่กำหนด

ทั้งนี้เมื่อได้ค่า  $\hat{\mu}$  แล้วจะสามารถประมาณค่าต่างๆ ได้สมการ

$$\hat{\mu} = \frac{\hat{x}_{ds}}{\hat{x}'_{ds}} = \frac{x_T + \hat{x}_L + x_d}{x_T + x_L + x'_d} \quad (12)$$

ซึ่ง  $\hat{x}_L = \frac{x_T + x_d - \hat{\mu}(x'_d + x_T)}{\hat{\mu} - 1} \quad (13)$

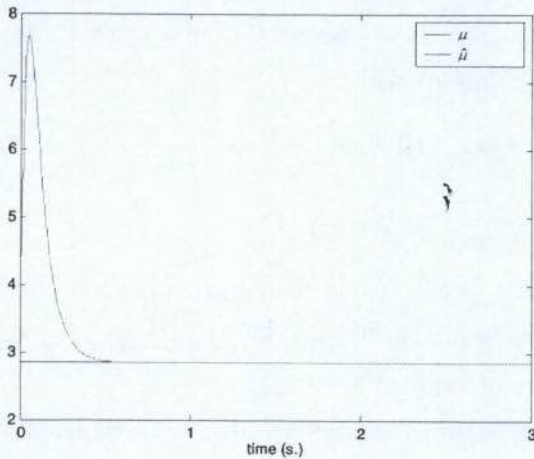
### ผลจากการ Simulation

ผลของการจำลองใช้ High gain feed forward Observer เพื่อประมาณค่า Line Impedance ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบ SMIB model โดยพิจารณาจาก  $\hat{\mu}$  ซึ่งเป็นค่าประมาณที่คำนวณได้จากตัวสังเกตการณ์เปรียบเทียบกับค่า  $\mu$ , ( $\mu = \frac{X_{ds}}{X'_{ds}}$ ) จาก Standard Modeling (สมการที่ 1-7)

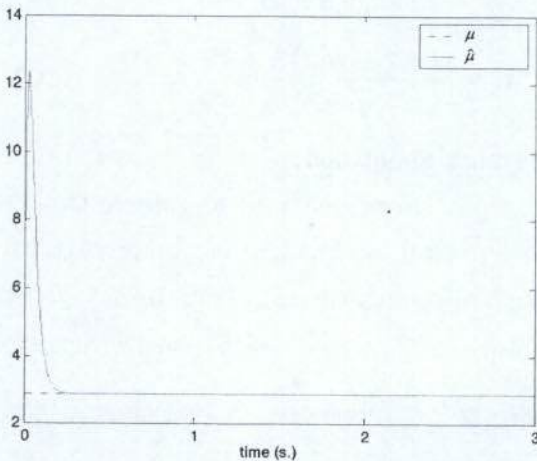
เมื่อใช้ค่า Tuning parameter ( $\theta$ ) ค่าต่างๆ แสดงในรูปที่ 4 และ 5 ทั้งนี้ค่า parameter ต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นดังนี้

$$\begin{aligned}
 D &= 2.4 \text{ p.u.}, & H &= 4.0 \text{ p.u.} \\
 \omega &= 314.159 \text{ rad/s.}, & T_{d0} &= 3.45 \text{ s.} \\
 x_d &= 1.863 \text{ p.u.}, & x'_d &= 0.257 \text{ p.u.} \\
 x_T &= 0.127 \text{ p.u.}, & P_m &= 0.2 \text{ p.u.}
 \end{aligned}$$

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่าประมาณของ  $\hat{\mu}$  จากตัวสังเกตการณ์เมื่อใช้  $\theta = 20$  มีความสามารถลู่เข้า (Converge) สู่มูลค่า  $\mu$  ได้ดี ซึ่งถ้าหากใช้  $\theta = 40$  ดังในรูปที่ 5 ความสามารถลู่เข้าของ  $\hat{\mu}$  ก็จะทำได้เร็วขึ้นกว่าเดิม อย่างไรก็ตามค่า  $\theta$  ที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดผลของค่าสูงชั่วขณะ (transient peak) หรือ เกิดการแกว่ง (Oscillation) ได้



รูปที่ 4 ผลประมาณค่าของ  $\mu$  เมื่อใช้ค่า  $\theta = 20$



รูปที่ 5 ผลประมาณค่าของ  $\mu$  เมื่อใช้ค่า  $\theta = 40$

หมายเหตุ ค่า  $P_m$  ที่ใช้ในสมการหลักนั้น โดยทั่วไปเป็นค่ากำลังไฟฟ้าทางกล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า parameters ต่างๆ ทางด้านงานกล เช่น อัตราขยายของ Turbine หรือ การควบคุมวาล์วไอน้ำ ฯลฯ สำหรับในบทความนี้ กำหนดให้  $P_m$  มีค่าคงที่ ซึ่งเป็นค่าโดยทั่วไปในเชิงปฏิบัติ อย่างไรก็ตามถึงแม้จะมีค่าคงที่หรือไม่ก็ตาม จะไม่มีผลต่อค่าจำนวนเนื่องมาจากค่า  $P_m$  ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบตัวสังเกตการณ์ในบทความนี้

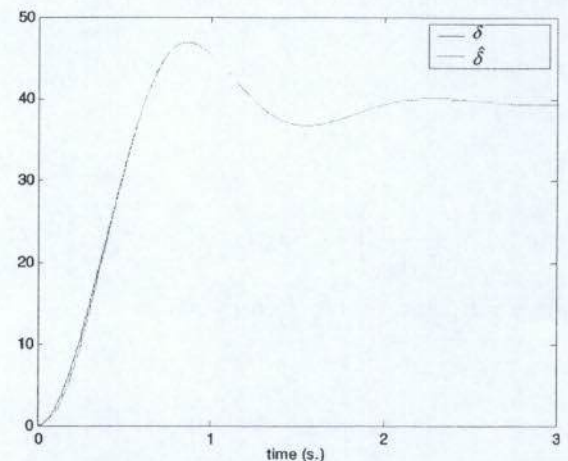
### 3. การประมาณค่ามุมเฟสแรงดัน ( $\delta$ )

จากสมการกำลังไฟฟ้าในระบบส่งกำลัง (5) สามารถเขียนสมการมุมเฟสแรงดันไฟฟ้าได้เป็น

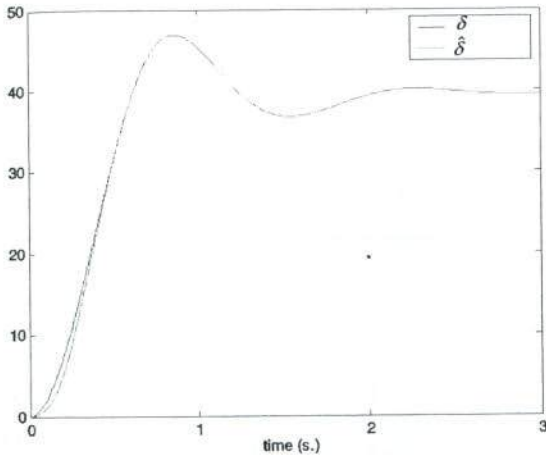
$$\begin{aligned}
 \delta &= \sin^{-1} \left\{ \left( \frac{\hat{X}_{ds}}{\hat{X}_{ad}} \right) \left( \frac{P_e}{I_f V_s} \right) \right\} \\
 &= \sin^{-1} \left\{ \left( \frac{X_T + \hat{X}_L + X_d}{\hat{X}_{ad}} \right) \left( \frac{P_e}{I_f V_s} \right) \right\}
 \end{aligned} \tag{14}$$

ซึ่งถ้าหากค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกติฟสามารถวัดค่าได้ก็สามารถประมาณค่ามุมเฟสได้เช่นกัน, ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 P_e \cot \delta &= Q_e + \frac{V_s^2}{\hat{X}_{ds}} \\
 \delta &= \cot^{-1} \left\{ \frac{1}{P_e} \left( Q_e - \frac{V_s^2}{X_T + \hat{X}_L + X_d} \right) \right\}
 \end{aligned} \tag{15}$$



รูปที่ 6. ผลการประมาณค่า  $\delta$  โดยใช้สมการที่ (14)



รูปที่ 7. ผลการประมาณค่า  $\delta$  โดยใช้สมการที่ (15)

#### ผลจากการ Simulation

รูปที่ 6. และ 7. แสดงให้เห็นว่าค่ามุมเฟสแรงดันของระบบไฟฟ้าแบบ Single Machine Infinite Bus ( $\delta$ ) สามารถประมาณค่าได้ด้วยสมการที่ (14) หรือ (15) ซึ่งการประมาณค่าด้วยสมการที่ (14) ให้ผลได้ค่อนข้างแม่นยำกว่าสมการที่ (15) โดยเฉพาะเมื่อระบบอยู่ในช่วงสภาวะชั่วคราว

#### 4. สรุป

ในบทความนี้นำเสนอการประมาณค่าอิมพีแดนซ์ในสายส่งกำลังและมุมเฟสแรงดันระหว่างบัสในระบบไฟฟ้าแบบ Single Machine Infinite Bus โดยการประยุกต์ให้การคำนวณแบบ Feed Forward แบบตัวสังเกตการณ์เกณฑ์ขยายสูง

ผลการจำลองระบบดังกล่าวให้ความแม่นยำของผลลัพธ์และประสิทธิภาพในการลู่เข้า (Converge) ค่อนข้างดี จึงเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมต่างๆ ในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Wang, D. Hill, R.H. Middleton, "Transient stability enhancement and voltage regulation of power systems", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 8 No. 2, 1993.
- [2] A. Burgen, "Power System Analysis", Prentice Hall, 1986.
- [3] K. Busawon, M Farza and H.Hammouri, "Observer design for a special class of nonlinear systems", International Journal of Control, Vol. 71 No. 3, pp. 405-418, 1998.
- [4] K. Busawon and M. Sarif, "A constant gain observer design methodology for nonlinear systems", Proceeding on American Control Conference, Philadelphia, 1998.
- [5] J.H. Chow, P.Kokotovic, R.J. Thomas, Editors, "Systems and Control Theory for Power Systems", IMA Volumes in Mathematics and its Applications, Vol. 64, Springer-Verlag, 1995.
- [6] F.P. de Mello, C Concordia, "Concepts of Synchronous machine stability as affected by excitation control", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, pp 316-329, April 1969.
- [7] M.A. Pai, "Energy Function Analysis for Power System Stability", Kluwer, Academic Publishers, 1989.



วันชัย ทรัพย์สิงห์ สำเร็จการศึกษา วศ.ม. จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, Ph.D. (Electrical Engineering) จาก Northumbria University, UK. ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ : Power Electronics, Electrical Drives, FACTs และ Wind Generator controls.