

การศึกษาการเปรียบเทียบระบบจำหน่ายไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อลดความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีหาค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมด

Comparing the distribution of electrical system at the industrial factory to reduce cost and losses of transformers by using Total Ownership Cost Analysis Technique

วิชัย สุระพัฒน์¹ รัชชน อมดวง^{1*} และ นพดล คะเตปะนันท¹

Vichai Surapat¹, Runch Omdoung^{1*} and Noppadon Katepananon¹

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบการวางแผนระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโรงงานอุตสาหกรรมสองแบบ ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น มูลค่าซื้อขายของหม้อแปลงไฟฟ้า อัตราดอกเบี้ย ค่าความสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลง ค่าความสูญเสียแบบมีภาระ จึงนำรูปแบบจำลองการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า 2 แบบสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมนำมาคำนวณหาระบบจำหน่ายที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุด บทความนี้จะอธิบายการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดของหม้อแปลงระบบจำหน่ายทั้ง 2 แบบด้วยวิธีหาค่าความเป็นเจ้าของทั้งหมดด้วยรูปแบบการใช้ไฟฟ้าแบบอัตราค่าไฟฟ้าที่แตกต่างกันตามช่วงเวลาของการใช้ไฟฟ้า

ABSTRACT

This article presents a comparison between the planning of electric power distribution system, with two type of factories, where there are many factors that affect expenses throughout the life cycle of the transformer, such as the value of the interest rate, no-load loss and load loss of transformer. There are 2 models, for example, the installation of 2 transformers for industrial to determine the best distribution system. This article will explain to calculate the total cost of the 2 distribution transformer model with a total ownership cost technique with time of use rates (TOU).

Key words: Total ownership cost, Transformer, Industrial

*Corresponding author; e-mail address: runch_wing@hotmail.com

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถ.งามวงศ์วาน เขต จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 50 Ngamwongwan Road Chatuchak Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันมีการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นในประเทศไทย การออกแบบระบบจำหน่ายไฟฟ้าของผู้ประกอบการจึงจำเป็นต้องวางแผนเพื่อที่จะทำให้ผู้ประกอบการลดค่าใช้จ่ายในส่วนของคุณค่าสูญเสียในระบบให้มากที่สุด สามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่สุด

บทความนี้จึงได้ทำการศึกษาการคำนวณค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมดของหม้อแปลงไฟฟ้าทุกตัวที่ต่ออยู่ในระบบ เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายจากค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทำการศึกษาค่าใช้จ่ายทั้งหมดของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าตัวอย่างทั้งสองแบบเพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบให้เห็นค่าใช้จ่ายของคุณค่าสูญเสียในระบบ เพื่อให้มีความคุ้มค่าในการลงทุนมากที่สุด

โดยจะทำการคำนวณถึงมูลค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์และค่าความสูญเสียของหม้อแปลงภายในระบบจำหน่ายไฟฟ้าสองรูปแบบด้วยอัตราค่าไฟฟ้า TOU และนำมาเปรียบเทียบกัน ว่าแบบไหนมีความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งมากที่สุด

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์การทำงาน

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ Laptop
2. โปรแกรม Microsoft Excel

นำแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมสองแบบมาวิเคราะห์ และรวบรวมข้อมูลทางเทคนิคของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหมดจากผู้ผลิตเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณด้วยวิธีหาค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมดแสดงให้เห็นใน Table 1

Table 1 Transformers Technical Specifications

Transformer	Size (kVA)	Bid price (Baht)	No Load losses (kW)	Load Losses (kW)
A1	6000	2,550,000.00	5.2	48
B1	2500	1,400,000.00	3	28
C1	2000	1,050,000.00	2.5	23
A2	1500	850,000.00	2.2	18
B2	2500	1,500,000.00	3.2	28
C2	2000	1,100,000.00	2.6	23

รูปแบบที่ 1 และ 2 ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมแสดงให้เห็นใน ภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยรูปแบบที่ 1 ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า B1, C1 จะรับแรงดัน 6.9 kV จากหม้อแปลง A1 และในรูปแบบที่ 2 หม้อแปลงไฟฟ้า A2, B2, C2 จะรับแรงดัน 22 kV โดยตรงจากระบบจำหน่าย

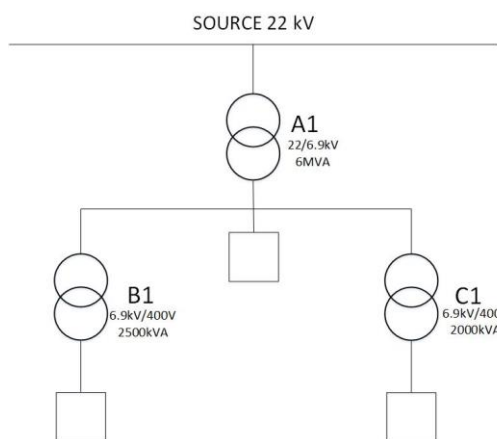


Figure 1 Distribution system model 1

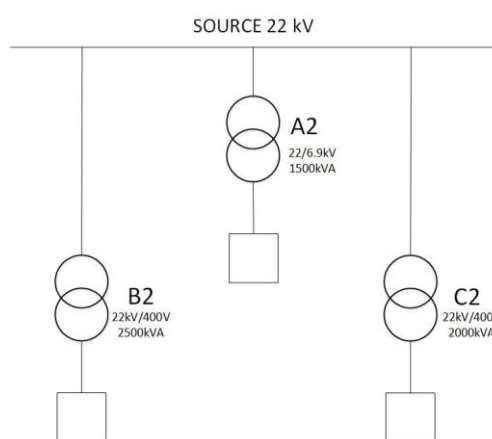


Figure 2 Distribution system model 2

การคำนวณค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมดสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า คือผลรวมของราคาหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าความสูญเสียทางไฟฟ้า ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าความสูญเสียทางเทคนิคสองแบบคือ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก และค่าความสูญเสียในขดลวด(Paul, 1984) โดยการคำนวณด้วยวิธีการหาค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมดนี้ ถูกกำหนดค่าใช้จ่ายต่อวัตต์ (บาท/วัตต์) สำหรับค่าความสูญเสียทั้งสองแบบ ค่าใช้จ่ายต่อวัตต์สำหรับค่าความสูญเสียแบบไม่มีภาระถูกกำหนดด้วยตัวแปร A และค่าใช้จ่ายต่อวัตต์สำหรับค่าความสูญเสียแบบมีภาระถูกกำหนดด้วยตัวแปร B

วิธีคำนวณค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมดนั้น ขึ้นอยู่กับต้นทุนที่เพิ่มขึ้นทั้งหมดในการเป็นเจ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า ประกอบด้วยต้นทุนของหม้อแปลงไฟฟ้า ค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าทั้งสองแบบ อัตราเงินเฟ้อที่เพิ่มขึ้น (Troy, 2015) ค่าไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และรวมถึงค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นด้วย

ค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมด (Total Ownership Cost : TOC) คำนวณจากสมการ

$$TOC = BP + (A \times NL + B \times LL) \quad (1)$$

โดยบทความนี้จะคำนวณในรูปแบบการใช้ไฟฟ้าแบบอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use : TOU)

$$TOC = BP + [(A_p \times NL) + (A_{op} \times NL)] + [(B_p \times LL) + (B_{op} \times LL)]$$

โดยที่

$$A_p = \frac{(DC' + (H_p \times EC_p'))}{(FCR \times 1000)} \quad (2)$$

$$A_{op} = \frac{(DC' + (H_{op} \times EC_{op}'))}{(FCR \times 1000)} \quad (3)$$

$$B_p = \frac{((PL^2 \times RF \times DC') + (PL^2 \times H_p \times LSF \times EC'_p))}{(FCR \times 1000)} \quad (4)$$

$$B_{op} = \frac{((PL^2 \times RF \times DC') + (PL^2 \times H_{op} \times LSF \times EC'_{op}))}{(FCR \times 1000)} \quad (5)$$

โดยค่า A_p, A_{op}, B_p, B_{op} ในการอยู่ในหน่วย บาทต่อวัตต์

ตัวแปรต่อไปนี้จะเป็นตัวแปรที่ใช้ในสมการหาค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมด ค่าที่ใช้จะใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทุกตัวในระบบ

- Fixed Charge Rate (FCR) : คือค่าใช้จ่ายที่คำนวณได้ต่อปีของหม้อแปลงไฟฟ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ประกอบด้วย ภาษี ค่าเสื่อมราคา อัตราค่าซ่อมบำรุง ในที่นี้ กำหนดให้เท่ากับ 15%
- Bid Price (BP) : ราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า
- $Watts_{NL}$ (NL) : ค่าความสูญเสียพลังงานไฟฟ้าแบบไม่มีภาระในหน่วยวัตต์ ในสมการนี้ค่าใช้จ่ายต่อวัตต์จะอยู่ในรูปตัวแปร A_p สำหรับช่วง peak และ A_{op} สำหรับช่วง off-peak
- $Watts_{LL}$ (LL) : ค่าความสูญเสียพลังงานไฟฟ้าแบบมีภาระในหน่วยวัตต์ ในสมการนี้ค่าใช้จ่ายต่อวัตต์จะอยู่ในรูปตัวแปร B_p สำหรับช่วง peak และ B_{op} สำหรับช่วง off-peak
- Peak Hours Per Year (H_p) : จำนวนชั่วโมงการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในช่วง peak ต่อปี ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับวันละ 16 ชั่วโมง หรือ 5840 ชั่วโมงต่อปี
- Off Peak Hours Per Year (H_{op}) : จำนวนชั่วโมงการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในช่วง off-peak ต่อปี ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับวันละ 8 ชั่วโมง หรือ 2920 ชั่วโมงต่อปี
- Demand Charge (DC) : ค่าความต้องการไฟฟ้ากำหนดโดย กฟภ. ในที่นี้กำหนดให้ใช้ในหน่วย บาทต่อกิโลวัตต์ต่อปีโดย DC ที่เดิมเป็นค่าที่ใช้รายเดือนจึงต้องคูณด้วย 12 เพื่อแปลงให้เป็นรายปี
- Energy Cost (EC) : ราคาไฟฟ้าในหน่วย บาท/kWh สำหรับตลอดทั้งอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า แบ่งเป็นช่วง peak load และ off-peak load
- Peak Load (PL) : การประมาณของโหลดสูงสุดประจำปีหม้อแปลงไฟฟ้าจริงโดยสันนิษฐานว่าโหลดสูงสุดจะเติบโตในอัตราคงที่คิดในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ โดยค่าที่เพิ่มขึ้นนี้จะถูกใช้ในการคำนวณทั้งอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า $(PL)^2$ ถูกใช้ในการคำนวณในสมการมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$(PL)^2 = \frac{(PL_i)^2[(1+i)^n - (1+g)^{2n}]}{(1+i)^n[(1+i) - (1+g)^2]} \times CRF_n \quad (6)$$

PL_i : โหลดสูงสุดจากการคาดการณ์ในช่วงปีแรกของการติดตั้ง

g : เปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของโหลดสูงสุดต่อปีตลอดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า

i : อัตราเฉลี่ยของดอกเบี้ยเงินกู้

n : ระยะเวลาตลอดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า ในบทความนี้กำหนดที่ 20 ปี

CRF_n : การคำนวณจำนวนเงินเป็นรายเดือนหรือรายปี ตามระยะเวลาและอัตราดอกเบี้ยที่กำหนด ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยสมการต่อไปนี้

$$CRF_n = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (7)$$

Peak Loss Responsibility Factor (RF) : คืออัตราส่วนที่แตกต่างระหว่างโหลดสูงสุดที่ตัวหม้อแปลงไฟฟ้าและโหลดสูงสุดที่ระบบไฟฟ้า

$$RF = \left(\frac{\text{Transformer load at time of system peak}}{\text{Transformer Peak load}} \right)^2 \quad (8)$$

Loss Factor (LSF) : ค่า Loss Factor นั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่า Load Factor แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยการทดสอบของโหลดทางไฟฟ้าเราจะพบความสัมพันธ์ของทั้ง 2 แพลตฟอร์มดังสมการนี้

$$LSF = 0.2 \times (\text{Load Factor}) + 0.8 \times (\text{Load Factor})^2 \quad (9)$$

วิธีการหนึ่งในการจัดการอัตราเงินเฟ้อ คือ เพิ่มต้นทุนผันแปรในอนาคต เช่นต้นทุนของการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า โดยหาค่าร้อยละแสดงเป็นอัตราเงินเฟ้อโดยทั่วไป สำหรับการคำนวณตัวแปร A และ B สมการต่อไปนี้เป็นกรคำนวณการเพิ่มขึ้นจากอัตราเงินเฟ้อ(Troy, 2015)

$$A_p' = A_p \times X \times \frac{(1-X^n)}{(1-X)} \times CRF_n \quad (10)$$

โดยที่

$$X = \text{การปรับปรุงอัตราเงินเฟ้อ} \quad \frac{(1+r')}{(1+i)} \text{ สำหรับ } r' \neq 1$$

$$A_p' = \text{ค่าหลังจากปรับปรุงอัตราเงินเฟ้อ} \quad A_p = \text{ค่าก่อนปรับปรุงอัตราเงินเฟ้อ}$$

$$n = \text{จำนวนปีที่นำมาคำนวณ} \quad i = \text{อัตราเฉลี่ยของการจ่ายดอกเบี้ยเงินกู้}$$

$$p = \text{อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานต่อปีเป็นเปอร์เซ็นต์}$$

$$ig = \text{อัตราเงินเฟ้อต่อปีเป็นเปอร์เซ็นต์} \quad r' = \text{อัตราเงินเฟ้อสมมูล}$$

$$r' = \frac{(1+P)}{(1+ig)} - 1 \text{ สำหรับ } P \geq ig \quad (11)$$

ค่าที่ใช้ในการคำนวณ

Table 2 Input data

Input Data	Values	Input Data	Values
FCR (Fix Charge Rate) (%)	15%	ig (General Inflation Rate)(%)	2%
RF (Peak Loss Responsibility Factor)	0.81	DC (Baht/kW-year)	1595.16
g (Load Demand Growth)(%)	4.23%	EC at peak (Baht/kWh)	4.2097
I (Interest Rate)(%)	7%	EC at off peak (Baht/kWh)	2.6295
n (Study period)(Year)	20	Hours at peak (hr)	5840
lf (Load Factor)(%)	0.7	Hours at off peak (hr)	2920
p (Energy escalation rate)	2.30%		

นำข้อมูลทั้งหมดมาคำนวณใน Microsoft Excel และนำผลมาแสดงเป็นกราฟของค่าใช้จ่ายทั้งหมดโดยค่าไฟฟ้าแบบ TOU ที่นำมาใช้ในการคำนวณ จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 2558

ผลการทดลองและวิจารณ์

Table 3 Results from calculation

Transformer	Bid price(Baht)	Cost of LL(Baht)	Cost of NLL(Baht)	TOC(Baht)
A1	2,550,000.00	7,470,542.77	1,259,594.12	11,280,136.89
B1	1,400,000.00	4,357,816.62	726,688.91	6,484,505.53
C1	1,050,000.00	3,579,635.08	605,574.09	5,235,209.17
Sum of Model 1	5,000,000.00	15,407,994.47	2,591,857.12	22,999,851.59
A2	850,000.00	2,801,453.54	532,905.20	4,184,358.74
B2	1,500,000.00	4,357,816.62	775,134.84	6,632,951.46
C2	1,100,000.00	3,579,635.08	629,797.06	5,309,432.14
Sum of Model 2	3,450,000.00	10,738,905.23	1,937,837.10	16,126,742.33

จากการคำนวณข้างต้น แสดงให้เห็นค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปีของหม้อแปลงไฟฟ้าในทั้งสองรูปแบบโดยแบบที่ 1 มีค่าใช้จ่ายทั้งหมดอยู่ที่ 22,999,851.59 บาท และแบบที่ 2 มีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 16,126,742.33 บาท ซึ่งมีความแตกต่างกันถึง 29.83%

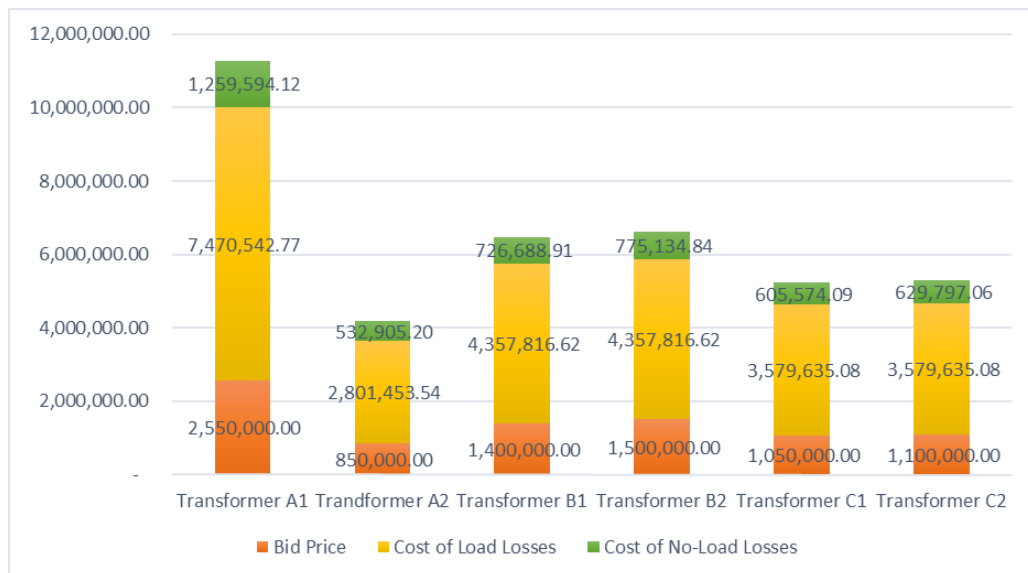


Figure 3 Cost results for every transformers from table 3

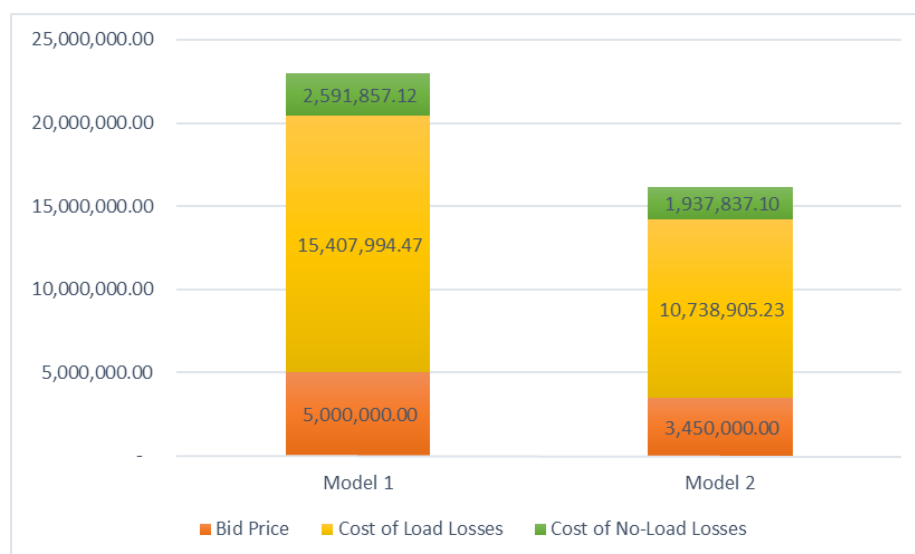


Figure 4 Cost results for 2 models from table 3

รูปที่ 3 แสดงค่าใช้จ่ายทั้งหมดของหม้อแปลงไฟฟ้าทุกตัวที่นำมาคำนวณในระยะเวลา 20 ปี และรูปที่ 4 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดของระบบจำหน่ายทั้ง 2 รูปแบบในระยะเวลา 20 ปี โดยที่หม้อแปลงไฟฟ้า B1 และ B2 จะมีค่าความสูญเสียแบบมีโหลดเท่ากัน แต่ค่าความสูญเสียแบบไม่มีโหลด B2 จะมีค่าสูงกว่า และที่หม้อแปลงไฟฟ้า C1 และ C2 จะมีค่าความสูญเสียแบบมีโหลดเท่ากัน แต่ค่าความสูญเสียแบบไม่มีโหลด C2 จะมีค่าสูงกว่า เมื่อมองภาพรวมรูปแบบที่สองจะมีค่าใช้จ่ายจากความสูญเสียน้อยกว่ารูปแบบที่หนึ่ง

สรุป

การคำนวณด้วยวิธีหาค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมดนั้น ควรใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทุกตัวที่มีอยู่ในระบบ โดยระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของรวมต่ำที่สุดจะเป็นการลงทุนตลอดอายุการใช้งานที่คุ้มค่าที่สุด ผลจากการวิเคราะห์รูปแบบที่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ โดยมีวิธีการประเมินผลที่คำนึงถึงพลังงานที่สูญเสีย และการผันผวนของค่าเงินรายปีที่ต้องพิจารณาในการจัดซื้อของหม้อแปลงไฟฟ้า และรูปแบบการใช้ไฟฟ้าซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอการคำนวณการใช้ไฟฟ้าแบบ TOU แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบการใช้งานในอนาคตเช่นมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้ไฟฟ้า จึงต้องพิจารณาเงื่อนไขเพิ่มเติมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท ถิรไทย จำกัด (มหาชน) สำหรับข้อมูลทางเทคนิคของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณอาจารย์และนักวิจัยโครงการพัฒนาความชำนาญด้านไฟฟ้ากำลังสำหรับคำแนะนำและคำปรึกษาในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

โครงการพัฒนาความชำนาญด้านไฟฟ้ากำลัง. 2557. **งานศึกษาความเหมาะสมโครงการเปลี่ยนระดับ**

แรงดันไฟฟ้าในพื้นที่ภาคใต้ จาก 33 เควี เป็น 22 เควี. คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

Eleftherios I. Amoiralis, Marina A. Tsili, Antonios G. Kladas. 2010. Economic Evaluation of Transformer Selection in Electrical Power System. XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010 .Rome, Italy.

Paul R. Rasmusson. 1984. Transformer Economic Evaluation. IEEE Transactions on Industry Application, Vol. IA-20, No.2. 355-363

Troy Knutson, P.E. 2015. Conducting Distribution Transformer Evaluations Using the Total Ownership Cost Method. 2015 IEEE Electric Power Conference. 97-102.