

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ МАКСИМАЛЬНЫЙ КПД ТРАНСФОРМАТОРА

Суеркулов Манас Асанбекович, профессор, Кыргызский технический университет им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч.Айтматова, 66

Попова Инга Эдуардовна, старший преподаватель, Кыргызский технический университет им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч.Айтматова, 66

Суеркулов Семетей Манасович, аспирант, Кыргызский технический университет им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч.Айтматова, 66

Аннотация. В статье приведены факторы, влияющие на электрические и магнитные потери в силовых трансформаторах. Рассмотрены методы компенсации реактивной мощности, применение компенсирующих устройств. Приведены примеры расчета потерь и максимального КПД трансформатора при котором магнитные потери равны электрическим. Зависимость нагрузки от косинуса «фи».

Ключевые слова: реактивная мощность, силовой трансформатор, потери, косинус «фи», источник реактивной мощности, магнитные и электрические потери.

KOMPENSATION OF JET POWER PROVIDING THE MAXIMUM EFFICIENCY OF THE TRANSFORMER

Suerkulov Manas Asanbekovich, professor, KSTU named after I.Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, C.Aitmatov Ave, 66

Popova Inga Eduardovna, the senior teacher, KSTU named after I.Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, C.Aitmatov Ave, 66

Suerkulov Semetei Manasovich, assistant, KSTU named after I.Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, C.Aitmatov Ave, 66

Abstract. Factors, which influence electric and magnetic losses in power transformers are given in article. Methods of compensation of jet power, use of the compensating devices are considered. Examples of calculation of losses and the maximum efficiency of a transformer are given. At which magnetic losses are equal to electric. Dependence of loading on a cosine «φ».

Keywords: jet power, power transformer, losses, cosine «φ», source of jet power, magnetic and electric losses.

Неотъемлемой составляющей научно-технических проблем электроснабжения является рациональная компенсация реактивной мощности (КРМ), поскольку более трети реактивной мощности (РМ) генерируется компенсирующими устройствами (КУ) поблизости от приемников электрической энергии (ПЭЭ) и передается через силовые трансформаторы различной мощности и номинального напряжения. В результате, в системах электроснабжения (СЭС) уменьшаются потери активной мощности электроэнергии (ЭЭ) и напряжения. Поэтому рациональная КРМ имеет значительное народнохозяйственное значение.

Существуют указания по компенсации реактивной мощности. Чем ближе установлен источник реактивной мощности к ПЭЭ, тем эффективнее применение компенсирующих устройств. Поэтому обеспечение максимального КПД каждого элемента системы электроснабжения позволяет экономить топливно-энергетические ресурсы.

Трансформатор, как основной элемент, используется для передачи реактивной и активной мощности. При передаче мощности происходят потери активной и реактивной мощности в трансформаторе. Поэтому для уменьшения потерь необходимо, чтобы трансформаторы работали с максимальным КПД.

Рассмотрим от каких факторов зависят потери в силовом трансформаторе. Согласно [1] потери в трансформаторе делятся на электрические и магнитные. Электрическими потерями называют переменные потери, так как величина зависит от нагрузки трансформатора. Магнитные потери происходят в магнитопроводе трансформатора. Причины этих потерь - систематическое перемагничивание магнитопровода магнитным потоком [1]. Это перемагничивание вызывает в магнитопроводе два вида магнитных потерь: потери на гистерезис P_H и потери на вихревые токи P_{BT} .

При неизменном первичном напряжении магнитные потери постоянны. Активная мощность P_1 , поступающая из сети в первичную обмотку трансформатора, частично расходуется на электрические потери в этой обмотке $P_{Э1}$. Переменный магнитный поток вызывает в магнитопроводе трансформатора магнитные потери. Оставшаяся после этого мощность

$$P_{эм} = P_1 + P_{Э1} + P_m, \text{ Вт} \quad (1)$$

называется электромагнитной мощностью и передается во вторичную обмотку, где частично расходуется на электрические потери в этой обмотке $P_{Э2}$ [1]. Активная мощность, поступающая в сеть,

$$P_2 = P_1 - \sum P, \text{ кВт} \quad (2)$$

где

$$\sum P = P_{\text{эл}} + P_{\text{м}} + P_{\text{э2}}, \quad (3)$$

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется как отношение активной мощности на выходе вторичной обмотки P_2 (полезная мощность) к активной мощности на входе первичной обмотки P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{(P_1 - \sum P)}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}, \text{ о.е.} \quad (4)$$

Сумма потерь

$$\sum P = P_{\text{xx}} + K_3^2 \cdot P_{\text{н.кз}}, \text{ кВт} \quad (5)$$

где P_{xx} , $P_{\text{н.кз}}$ - потери холостого хода и короткого замыкания которые определяются опытным путем и приводятся в справочнике.

Активная мощность на выходе вторичной обмотки трехфазного трансформатора:

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 I_2 \cos \varphi_2 = K_3 \cdot S_{\text{нм}} \cdot \cos \varphi_2, \text{ Вт} \quad (6)$$

где $S_{\text{нм}}$ - номинальная мощность трехфазного трансформатора.

$$S_{\text{нм}} = \sqrt{3} \cdot U_{2\text{н}} \cdot I_{2\text{н}}, \text{ Вт} \quad (7)$$

где U_2 , I_2 - линейные значения напряжения (В) и тока (А).

Учитывая

$$P_1 = P_2 + \sum P, \text{ кВт} \quad (8)$$

получим выражение для расчета КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{K_3 \cdot S_{\text{нм}} \cdot \cos \varphi_2}{K_3 \cdot S_{\text{нм}} \cos \varphi_2 + P_{\text{xx}} + K_3^2}, \text{ о.е} \quad (9)$$

Анализ выражения (9) показывает, что КПД трансформатора зависит от величины K_3 и от характера $\cos \varphi_2$ нагрузки.

Эта зависимость показана на рисунке 1.

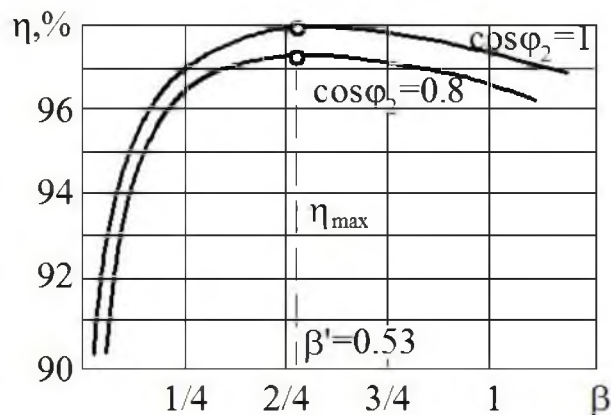


Рис. 1

Максимальное значение КПД соответствует нагрузке, при которой магнитные потери равны электрическим, т. е.

$$P_{\text{xx}} = K_3^2 \cdot P_{\text{н.кз}} \quad (10)$$

Отсюда значение K_3 соответствующее максимальному КПД:

$$K_{3\text{м}} = \sqrt{\frac{P_{\text{xx}}}{P_{\text{н.кз}}}}, \text{ о.е.} \quad (11)$$

Обычно КПД трансформатора имеет максимальное значение $0,45 \div 0,65$. Подставив в (9) вместо K_3 значение $K_{3\text{м}}$, получим выражение максимального КПД трансформатора:

$$\eta_M = \frac{K_{3M} \cdot S_{HT} \cdot \cos\varphi_2}{K_{3M} \cdot S_{HT} \cos\varphi_2 + 2P_{XX}}, \text{ о.е.} \quad (12)$$

т.к. $K_{3M}^2 \cdot P_{HK3} = \frac{P_{XX}}{P_{HK3}} \cdot P_{HK3} = P_{XX}$.

Из выражения (12) можно определить значение $\cos\varphi_2$, соответствующий максимальному значению КПД:

$$\eta_M (K_{3M} \cdot S_{HT} \cdot \cos\varphi_2 + 2P_{XX}) = K_{3M} \cdot S_{HT} \cdot \cos\varphi_2 \quad (13)$$

$$\eta_M \cdot K_{3M} \cdot S_{HT} \cdot \cos\varphi_2 + 2\eta_M \cdot P_{XX} = K_{3M} \cdot S_{HT} \cdot \cos\varphi_2 \quad (14)$$

$$2\eta_M \cdot P_{XX} = K_{3M} \cdot S_{HT} \cdot \cos\varphi_2 - \eta_M \cdot K_{3M} \cdot S_{HT} \cdot \cos\varphi_2 \quad (15)$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{2\eta_M \cdot P_{XX}}{K_{3M} \cdot S_{HT} - \eta_M \cdot K_{3M} \cdot S_{HT}} \quad (16)$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{2\eta_M \cdot P_{XX}}{K_{3M} \cdot S_{HT} (1 - \eta_M)} \quad (17)$$

Для подтверждения рассмотрим пример.

Пример 1. По [3] $S_{HT} = 1000$ кВА; 10/0.4кВ; $P_{XX}=3800$ кВт; $P_{HK3}=12700$ кВт; $U_{K3}=5,5\%$; $I_{XX}=2.3\%$.

Решение. Оптимальное значение коэффициента загрузки:

$$K_{3G} = \sqrt{\frac{3800}{12700}} = \sqrt{0.299} = 0.54$$

что соответствует вышеуказанным значениям. Коэффициент загрузки при проектировании СЭС принимается равным

- для ПЭЭ 1 категории 0.65÷0.75
- для ПЭЭ 2 категории 0.75÷0.85
- для ПЭЭ 3 категории 0.93÷0.95.

Для 1 категории ПЭЭ $K_3=0.7$, находим значение $\cos\varphi_2$ при $\eta_M=0.97$:

$$\cos\varphi_2 = \frac{2 \cdot 0.97 \cdot 3800}{0.7 \cdot 1000 \cdot 10^3 (1 - 0.97)} = \frac{7372}{21000} = 0.35$$

$\cos\varphi_2=0.35$, этому значению соответствует $tg\varphi_2=2.77$.

Для ПЭЭ 2 категории $K_{3M}=0.8$

$$\cos\varphi_2 = \frac{2 \cdot 0.97 \cdot 3800}{0.8 \cdot 1000 \cdot 10^3 (1 - 0.97)} = \frac{7372}{24000} = 0.3.$$

$\cos\varphi_2=0.3$, $tg\varphi_2=3.17$.

Для ПЭЭ 3 категории $K_{3M}=0.95$

$$\cos\varphi_2 = \frac{2 \cdot 0.97 \cdot 3800}{0.95 \cdot 1000 \cdot 10^3 (1 - 0.97)} = \frac{7372}{28500} = 0.26$$

$\cos\varphi_2=0.25$, $tg\varphi_2=3.79$.

Низкое значение $\cos\varphi_2$ показывает, что преобладает индуктивная нагрузка, поэтому требуется компенсация реактивной мощности. Согласно [4] необходимая мощность КУ равна:

$$Q_{КУ} = P_p (tg\varphi_2 - tg\varphi_0) \quad (18)$$

Оптимальное значение $tg\varphi_0$ определяется значением $tg\varphi$, которое должно быть достигнуто КРМ. После компенсации реактивной мощности согласно [4] $\cos\varphi=0.93$, $tg\varphi=0.4$,

$$Q_{КУ} = P_p (tg\varphi_2 - 0.4)$$

$\cos\varphi_2=0.35$; $P_p=0.35$; $S_{HT}=0.35 \cdot 1000=350$ кВА, тогда

$$Q_{КУ} = 350(2.77 - 0.4) = 350 \cdot 2.37 = 820.5 \text{ кВАр,}$$

что доказывает индивидуальный характер нагрузки.

Аналогично, можно провести расчеты для 2 и 3 категории:

$$Q_{ку} = 831 \text{ кВАр},$$

$$Q_{ку} = 847 \text{ кВАр},$$

Значение $Q_{ку} = 829.5; 831; 847$ кВАр, то есть существенно не отличаются. Относительно 829.5 кВАр погрешность $(847.5-829.5): 829.5 \cdot 100=21\%$.

Теперь определим максимальное значение КПД при $\cos\varphi=0.95$ для 1 категории ПЭЭ:

$$\eta_m = \frac{0.7 \cdot 1000 \cdot 10^3 \cdot 0.95}{0.7 \cdot 1000 \cdot 10^3 \cdot 0.95 + 2 \cdot 3800} = \frac{665 \cdot 10^3}{672 \cdot 10^3} = 0.988 \text{ или } 98.8\%,$$

Для других погрешностей КПД необходимо выбрать в этих пределах.

Пример 2. По [2] выбираем трансформатор $S_n=1000$ кВА; 10/0.4кВ; $P_{xx}=2450$ Вт; $P_{н.кз}=12200$ кВт; $U_{кз}=5,5\%$; $i_{xx}=1.4\%$.

Решение. Оптимальное значение коэффициента загрузки

$$K_{зо} = \sqrt{\frac{2450}{12200}} = \sqrt{0.2} = 0.45,$$

что соответствует выше указанному значению.

Для I категории

$$\cos\varphi_2 = \frac{2 \cdot 0.97 \cdot 2450}{0.7 \cdot 1000 \cdot 10^3 \cdot 0.03} = \frac{4753}{21000} = 0.22$$

$$\cos\varphi_2=0.22, \text{ tg}\varphi_2=4.95.$$

Значение мощности КУ

$$Q_{ку} = 220(4.49 - 0.4) = 979 \text{ кВАр}$$

Для остальных категорий мощность КУ определяется аналогично.

Определим максимальное значение КПД:

$$\eta = \frac{0.7 \cdot 1000 \cdot 10^3 \cdot 0.95}{0.7 \cdot 1000 \cdot 10^3 \cdot 0.95 + 2 \cdot 2450} = \frac{665 \cdot 10^3}{669.9 \cdot 10^3} = 0.99 \text{ или } 99\%.$$

Выводы:

1. Традиционный расчет выбора мощности КУ не гарантирует обеспечение максимального КПД трансформатора.
2. При выборе мощности КУ необходимо учитывать обеспечение максимального КПД трансформатора.
3. Современные трансформаторы с лучшей магнитной характеристикой допускают и требуют установки большей мощности КУ.

Список литературы

1. Кацман М.М. Электрические машины. Учебное пособие для студентов, 15-ое изд., - М.: Изд. Центр. академия, 2016 г. -406 с.
2. Бобин А.П., Пятнов Ф.Ю. Электроустановки потребителей. Справочник, -М.: ЗАО «Энергосервис», 2008 г. -616 с.
3. Справочник по проектированию электроснабжения линий электропередач и сетей. Под редакцией Я.М. Большмана, В.И. Карповича, М.Л. Со.,,,,,,, 2-ое изд., -М.: Энергия, 1974 г, -696 с.
4. Федоров А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий 2-ое изд. - М.: Энергия, 1972 г., -416 с