

И.В. Хоменко, С.К. Березка, И.В. Поляков

АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Приведені теоретичні і практичні положення оптимальності режимів роботи трансформаторного устаткування на підстанції при їх паралельній роботі. Розрахунки адаптовані для реальних умов експлуатації для енергетики України. Бібл. 9, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: трансформаторне устаткування, паралельна робота, оптимальний режим, реактивна потужність, економічно доцільний режим.

Приведены теоретические и практические положения оптимальности режимов работы трансформаторного оборудования на подстанции при их параллельной работе. Расчеты адаптированы для реальных условий эксплуатации для энергетики Украины. Библ. 9, табл. 1, рис. 2.

Ключевые слова: трансформаторное оборудование, параллельная работа, оптимальный режим, реактивная мощность, экономически целесообразный режим.

Введение. В энергосистеме Украины в эксплуатации находится более 100 высоковольтных подстанций. В тоже время в параллельной работе могут находиться до четырех трансформаторов на одной подстанции. При этом существенная часть от всех потерь электроэнергии приходится на потери в трансформаторах. Поэтому любые экономически целесообразные режимы работы трансформаторов на подстанциях относятся к эффективным мероприятиям по снижению потерь электроэнергии.

Теоретические исследования дают достаточно корректные рекомендации по оптимизации работы трансформаторного оборудования, основанные на каталожных данных. Однако в реальных условиях эксплуатации вследствие старения отдельных элементов трансформатора приходится оперировать паспортными или экспериментальными значениями. Эксперименты показывают, что наиболее изменяется величина потерь холостого хода (ХХ). При эксплуатации трансформатора свыше 20 лет величина потерь может увеличиваться на 1,75 % в год [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Проблемой снижения потерь в силовых трансформаторах занимаются многие ученые как отечественные, так и зарубежные. В конечном итоге все сводится к неоднозначной задаче определения оптимального критерия работы трансформаторного оборудования на подстанциях. Наибольшее распространение получили графо-аналитические методы.

Критерий оптимизации в виде минимума активных потерь мощности представлен в [2]. Такой подход отличается простотой, дает хорошие качественные результаты, однако в условиях эксплуатации требует существенных дополнений.

В [3] рассмотренный выше критерий разработан с учетом потоков реактивных мощностей. Предложенная методика повышает точность расчетов, приближая теоретические выкладки к реальным практическим результатам в условиях эксплуатации.

Критерий оптимизации в виде минимума потерь энергии представлен в [4]. Такой подход в различных интерпретациях находит сегодня широкое применение в различных нормативных и научно-практических

материалах. Эти критерии достаточно эффективны, но требуют достаточно точного и достоверного определения времени включения в работу силовых трансформаторов.

Критерии оптимизации с учетом величины КПД трансформатора представлены в [5]. Такое комплексное сочетание важнейших характеристик трансформаторного оборудования требует четких выкладок и обоснований [6], но однозначно представляет большой научный и практический интерес.

Связь критериев оптимизации и срока службы силовых трансформаторов представлена в [7].

Основываясь на литературных источниках и широко статистическом материале можно сделать следующий вывод: любые критерии оптимизации отражают те или иные стороны эффективной работы силовых трансформаторов. Решение вопроса практической ценности критериев оптимальной работы параллельно включенных трансформаторов невозможно без учета надежности схем электроснабжения, графиков нагрузки, времени включения, технического состояния основного энергетического оборудования (трансформаторы, выключатели).

Целью исследований является сравнительный анализ оптимальных режимов параллельной работы трансформаторного оборудования для различных условий эксплуатации: для однотипных и разнотипных трансформаторов, с учетом и без учета потоков реактивной мощности. В качестве критерия оптимизации использован минимум суммарных потерь активной мощности. С учетом всего вышеизложенного эта проблема представляет собой актуальную научно-практическую задачу [6, 8].

Теоретические положения. Наиболее экономичный режим работы трансформаторов соответствует нагрузке, пропорциональной их номинальной мощности [9].

Экономическое распределение нагрузок между параллельно работающими трансформаторами наступает в том случае, если их параметры одинаковы. К сожалению, на практике не всегда удается достигнуть такого положения, что бы на каждой подстанции

© И.В. Хоменко, С.К. Березка, И.В. Поляков

трансформаторы были однотипны. При этом нагрузка трансформаторов будет несколько отличаться от экономической из-за появления уравнивающих токов.

Для определения наиболее экономичного режима работы трансформаторов строят зависимости потерь трансформаторов от мощности его нагрузки $\Delta P_T = f(S)$.

Рассмотрим подстанцию с n -параллельно работающими однотипными трансформаторами. Потери мощности в однотипных трансформаторах без учета потоков реактивной мощности находятся по формуле:

$$\Delta P_T = n \cdot \Delta P_0 + \frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta P_k \cdot S^2}{S_{rat}^2}, \quad (1)$$

где n – количество параллельно работающих трансформаторов; ΔP_0 – потери холостого хода трансформатора; ΔP_k – потери короткого замыкания (КЗ) трансформатора; S – мощность нагрузки; S_{rat} – номинальная мощность трансформатора.

Потери мощности в однотипных трансформаторах с учетом потоков реактивной мощности находятся по формуле:

$$\Delta P_T = n \cdot (\Delta P_0 + K \cdot Q_{Fe}) + \frac{1}{n} \cdot \frac{(\Delta P_k + K \cdot Q_{Cu}) \cdot S^2}{S_{rat}^2}, \quad (2)$$

где K – коэффициент, равный 0,08;

$$Q_{Fe} = \frac{I_0 \cdot S_{rat}}{100} \quad (3)$$

– потери реактивной мощности в стали, I_0 – ток холостого хода трансформатора;

$$Q_{Cu} = \frac{U_k \cdot S_{rat}}{100} \quad (4)$$

– потери реактивной мощности в меди, U_k – напряжение короткого замыкания трансформатора.

Если установленные на подстанции трансформаторы разнотипны или различны по мощности, то они будут иметь разные потери P_0 и P_k . Применять при этих условиях указанных выше неравенства нельзя. Тогда для выбора числа параллельно включенных трансформаторов пользуются кривыми приведенных потерь. Их строят на координатной плоскости для каждого трансформатора и для нескольких одновременно [3].

Потери мощности для разнотипных трансформаторов без учета потоков реактивной мощности:

$$\Delta P_T = \sum P_0 + \sum P_k \cdot \frac{\sum S^2}{\sum S_{rat}^2}. \quad (5)$$

Потери мощности для разнотипных трансформаторов с учетом потоков реактивной мощности:

$$P_T = \sum (P_0 + K \cdot Q_{Fe}) + \sum (P_k + K \cdot Q_{Cu}) \cdot \frac{\sum S^2}{\sum S_{rat}^2}. \quad (6)$$

Если на подстанции установлено n трехобмоточных трансформаторов с мощностями всех трех обмоток, равными номинальной мощности S_T трансформатора, то по оси абсцисс следует откладывать нагрузку S_{SUB} подстанции:

$$S_{sub} = \sqrt{(S_{LV}^2 + S_{MV}^2 + S_{HV}^2)} / 2. \quad (7)$$

Действительно, в этом случае выражение примет вид:

$$\Delta P_{sub} = n \cdot \Delta P_0 + \frac{R_{100}}{n} \cdot \left(\frac{S_{HV}^2 + S_{MV}^2 + S_{LV}^2}{U_{rat}^2} \right), \quad (8)$$

где R_{100} – приведенное активное сопротивление обмотки, мощность которой равна 100 % от S_T :

$$R_{100} = \Delta P_k \cdot U_{rat}^2 / (2S_T^2). \quad (9)$$

Подставив последнее соотношение в (8), с учетом (7) получим

$$\Delta P_{sub} = n \cdot \Delta P_0 + \frac{P_k}{n} \cdot \left(\frac{S_{sub}}{S_T} \right)^2. \quad (10)$$

В тех случаях, когда мощность обмотки низкого напряжения (НН) трансформатора составляет 50, 40, или 25 % номинальной, сопротивление R_{100} надо соответственно увеличить в 2, 2,5 или 4 раза, после чего оно будет равно приведенному сопротивлению обмотки НН. Если через «а» обозначить коэффициент приведения сопротивления, то в общем виде значение фиктивной нагрузки трехобмоточных трансформаторов можно представить так:

$$S_{sub} = \sqrt{(aS_{LV}^2 + S_{MV}^2 + S_{HV}^2)} / 2. \quad (11)$$

Расчетная часть. В качестве исходных данных для расчетных примеров используем паспортные данные трансформаторов ТРДН-80000/110 и ТРДН-63000/110 сроком эксплуатации 32 и 37 лет соответственно (табл. 1). Расчеты проведены в среде *MathCad*.

Таблица 1

Паспортные данные трансформаторов

	ТРДН 80000/110	ТРДН- 63000/110
Номинальная мощность S_{rat} , МВА	80	63
Потери КЗ ΔP_k , МВт	0,310	0,245
Потери ХХ ΔP_0 , МВт	0,0696	0,06
Ток ХХ I_0 , %	0,5	0,5
Напряжение КЗ U_k , %	10,5	10,5
K	0,08	0,08

Пример 1.

Оптимизируем работу однотипных ТРДН-80000/110 трансформаторов $n = 3$ без учета потоков реактивной мощности.

Суммарные потери, зависящие от числа параллельно работающих трансформаторов (n) и нагрузки (S), определяются по выражению (1).

Диапазон изменения нагрузки $S = 0...110$ МВА. Зоны оптимизации приведены на рис. 1,а.

Пример 2.

Оптимизируем работу однотипных ТРДН-80000/110 трансформаторов $n = 3$ с учетом потоков реактивной мощности.

Потери реактивной мощности в стали определяются по выражению (3) $Q_{Fe} = 0,4$ МВар, а в меди – по выражению (4) $Q_{Cu} = 8,4$ МВар.

Суммарные потери с учетом потерь реактивной мощности определяются по выражению (2).

Диапазон изменения нагрузки $S = 0...100$ МВА. Зоны оптимизации приведены на рис. 1,б.

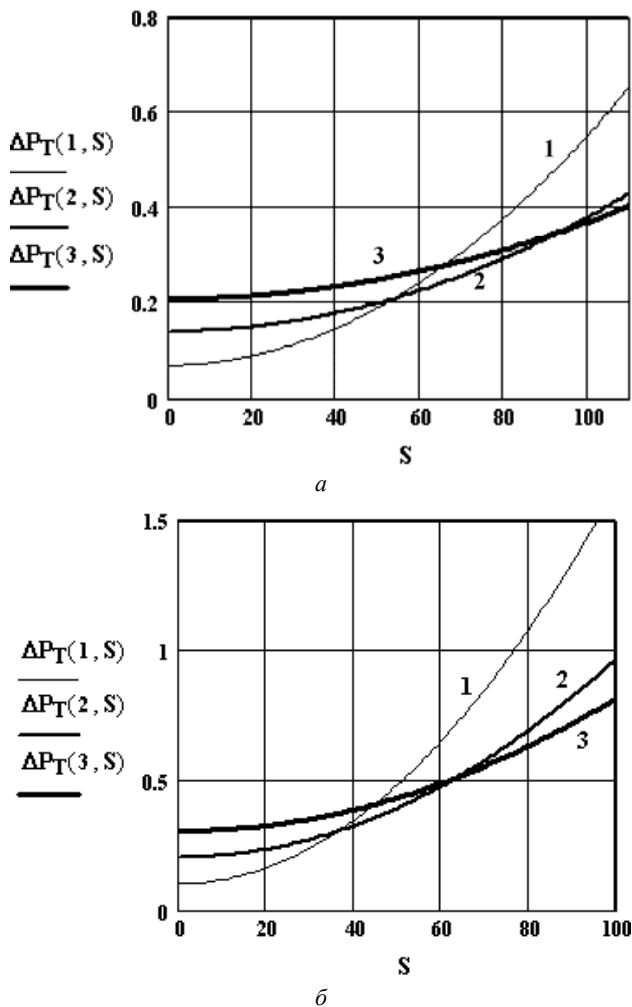


Рис. 1. Зависимость потерь мощности от нагрузки и числа однотипных трансформаторов ТРДН-80000/110 (1 – работает один трансформатор; 2 – работают два трансформатора; 3 – работают три трансформатора): а – без учета потоков реактивной мощности; б – с учетом потоков реактивной мощности

Пример 3.

Оптимизируем работу разнотипных ТРДН-80000/110 и ТРДН-63000/110 трансформаторов без учета потоков реактивной мощности.

$$\Delta P_{T1}(S) := \Delta P_{0,1} + \frac{\Delta P_{k1} \cdot S^2}{S_{rat1}^2} \text{ – потери в ТРДН-80000/110,}$$

$$\Delta P_{T2}(S) := \Delta P_{0,2} + \frac{\Delta P_{k2} \cdot S^2}{S_{rat2}^2} \text{ – потери в ТРДН-63000/110,}$$

Суммарные потери определяются по формуле (5).

Диапазон изменения нагрузки $S = 0 \dots 60$ МВА.

Зоны оптимизации приведены на рис. 2,а.

Пример 4.

Оптимизируем работу разнотипных трансформаторов ТРДН-80000/110 и ТРДН-63000/110 с учетом потоков реактивной мощности.

Потери реактивной мощности в стали и в меди приведенных трансформаторов определяются по выражениям (3) – (4): $Q_{Fe1} = 0,4$ МВар, $Q_{Cu1} = 8,4$ МВар, $Q_{Fe2} = 0,315$ МВар, $Q_{Cu2} = 6,615$ МВар.

$$\Delta P_{T1}(S) := (\Delta P_{0,1} + K \cdot Q_{Fe1}) + \frac{(\Delta P_{k1} + K \cdot Q_{Cu1}) \cdot S^2}{S_{rat1}^2} \text{ .-}$$

потери в ТРДН-80000/110,

$$\Delta P_{T2}(S) := (\Delta P_{0,2} + K \cdot Q_{Fe2}) + \frac{(\Delta P_{k2} + K \cdot Q_{Cu2}) \cdot S^2}{S_{rat2}^2} \text{ .-}$$

потери в ТРДН-63000/110,

Суммарные потери определяются по формуле (6).

Диапазон изменения нагрузки $S = 0 \dots 40$ МВА.

Зоны оптимизации приведены на рис. 2,б.

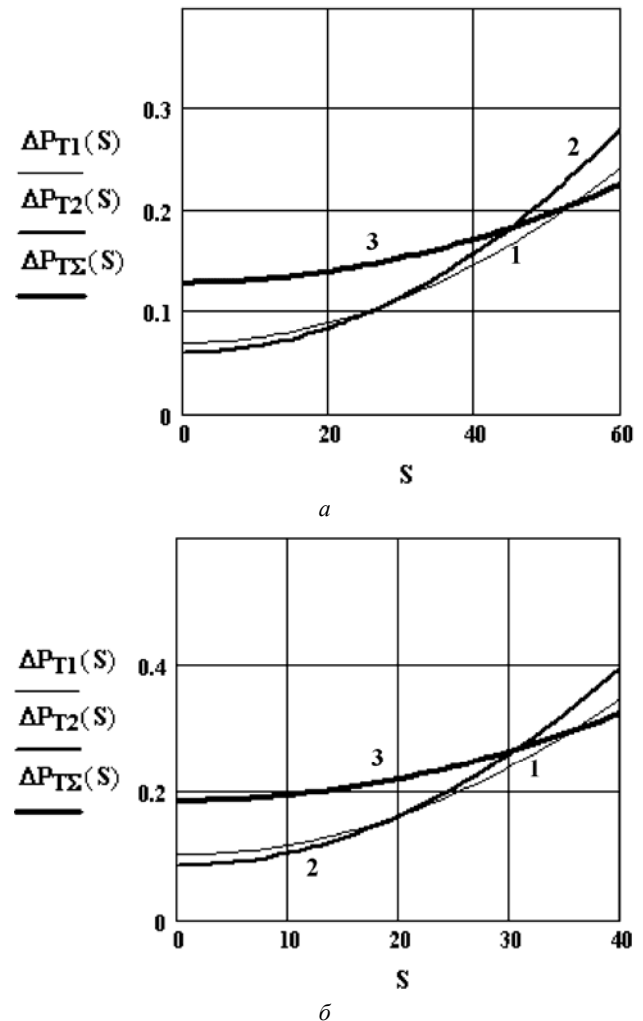


Рис. 2. Зависимость потерь мощности в разнотипных трансформаторах от нагрузки (1 – работает трансформатор ТРДН-80000/110; 2 – работает трансформатор ТРДН-63000/110; 3 – работают оба трансформатора): а – без учета потоков реактивной мощности; б – с учетом потоков реактивной мощности

Выводы.

В результате проведенных расчетов установлены области оптимизации трансформаторного оборудования подстанции при их параллельной работе. Расчеты проведены для реальных условий эксплуатации: для однотипных и разнотипных трансформаторов, с учетом и без учета потоков реактивной мощности.

Сравнительный анализ показывает погрешности, к которым приводит использование отдельных методик оптимизации, что в конечном итоге и определяет допустимость их использования. Максимальная

погрешность, обусловленная различием каталожных и паспортных данных для рассмотренных случаев, не превышает 20 %

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротков В.В., Козлов А.Б., Коротков А.В. Количественная оценка зависимости потерь холостого хода силовых трансформаторов от срока эксплуатации // Труды ИГЭУ. – 2007. – №8. – С. 351-356.
2. Радкевич В.Н., Трушников А.Л. О выборе критерия оптимизации работы силового трансформатора // Энергия и менеджмент. – 2004. – № 4-5. – С. 32-33.
3. Филатов А.А. Обслуживание электрических подстанций оперативным персоналом. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.
4. Методика визначення нераціонального (неефективного) використання паливно-енергетичних ресурсів [Текст] / – К.: НАЕР, 2009. – 134 с.
5. Фурсанов М.И. Методология и практика определения и анализа потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем: автореф. дис. ... докт. техн. наук / М.И. Фурсанов. – Минск, 2002. – 39 с.
6. Гончар А.А. О критериях оптимизации работы силового трансформатора // Энергия и менеджмент. – 2004. – №2. – С. 45.
7. Балабин А.А. Разработка методики расчета потерь электроэнергии в магнитопроводах длительно эксплуатирующихся силовых трансформаторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.А. Балабин. – Орел, 2009. – 18 с.
8. Куценко Г.Ф., Парфенов А.А. Выбор трансформаторов распределительных сетей 6-10 кВ по минимуму потерь электроэнергии // Энергоэффективность. – 2001. – №11. – С. 18-19.
9. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

REFERENCES

1. Korotkov V.V., Kozlov A.B., Korotkov A.V. Quantification of losses depending on the idling of power transformers lifetime. *Proceedings of the Ivanovo State Power University*, 2007, iss.8, pp. 351-356. (Rus).
2. Radkevich V.N., Trutnikov A.L. On the choice of optimization of the criterion power transformer. *Energy and management*, 2004, no.4-5, pp. 32-33. (Rus).
3. Filatov A.A. *Obsluzhivanie elektricheskikh podstantsiy operativnyim personalom* [Service of electric substations by operation personnel]. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1990. 304 p. (Rus).
4. *Metodyka vyznachennia neratsionalnogo vykorystannia palyvno-energetychnyh resursiv*. [Method of determining the irrational (inefficient) use of energy resources]. Kyiv, NAER Publ., 2009. 134 p. (Ukr).

5. Fursanov M.I. *Metodologia i praktika opredelenia i analiza poter elektroenergii*. Autoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Methodology and practice of identification and analysis of power losses in electric networks of power supply. Abstracts of doct. tech. sci. diss.] Minsk, 2002. 39 p. (Rus).
6. Gonchar A.A. On criteria for optimization of the power transformer. *Energy and management*, 2004, no.2, p. 45. (Rus).
7. Balabin A.A. *Razrabotka metodiki raschete poter elektroenergii v magniti provodah dlitelno ekspluatiruyuschihsia transformatorov*. Autoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development of the method of calculating energy losses in magnetic wires long maintained power transformers. Abstracts of cand. tech. sci. diss.]. Orel, 2009. 18 p. (Rus).
8. Kutsenko G.F., Parfenov A.A. Selecting distribution transformers 6-10 kV at a minimum electricity losses. *Energy efficiency*, 2001, no.11, pp. 18-19. (Rus).
9. Idelchik V.I. *Elektricheskie sistemy i seti: Uchebnik dlia vuzov* [Electrical Systems and Grids: Textbook for high schools]. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1989. 592 p. (Rus).

Поступила (received) 01.09.2016

Хоменко Игорь Васильевич¹, к.т.н. доц.,
Березка Сергей Константинович¹, к.т.н., ст. преп.,
Поляков Игорь Владимирович¹, к.т.н., доц.,
¹ Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 21,
e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com, serg.berezka@gmail.com

I.V. Khomenko¹, S.K. Berezka¹, I.V. Poliakov¹
¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Kyrychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Analysis of optimum operating modes of power transformers under operating conditions.

Purpose. The study of parallel operation optimal modes of transformer equipment for a variety of operating conditions: same or different types of transformers, with or without reactive power flows. **Methodology.** Losses of energy in transformers make 30 % of all losses. Therefore the choice of the economically justified parallel operation of transformers is effective action to reduce losses. Typically, in the calculations of reactive power flows in the transformers are not taken into account. It is interesting to analyze the optimal operating conditions of transformers with and without reactive power flows. **Results.** Calculations for transformers in distribution networks showed that the inclusion of reactive power flows in transformers significant impact on the calculated optimum regimes of transformers. References 9, tables 1, figures 2.

Key words: transformer equipment, parallel operation, optimal mode, reactive power, economically reasonable mode.