

енной или компенсированной, в зависимости от географического расположения источника электроэнергии.

ВЫВОД

Режим полуволны пригоден для передачи электроэнергии. Полуволевой линии свойственны изменения напряжения в промежуточных точках при изменении режима работы. Передаваемая мощность зависит только от угла сдвига, обусловленного генераторами и трансформаторами. При учете конечных устройств системы передачи имеются протяженности линий, при которых в системе передачи получается режим четверти волны со всеми его свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зеленохат, Н. И. Комбинированное объединение больших энергосистем / Н. И. Зеленохат, Ю. В. Шаров // Электричество. – 2006. – № 5.
2. Поспелов, Г. Е. Передача энергии и электропередачи / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2003.
3. Жданов, П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / П. С. Жданов. – М.: Энергия, 1979.
4. Колотилова, Д. Г. Исследование концевых трансформаторов для настройки линий на полуволну / Д. Г. Колотилова // Труды ТЭИ СО АН СССР. – 1963. – Вып. 16.
5. Воробьев, Г. В. Последовательно-параллельная схема связи промежуточных энергосистем с дальними электропередачами: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. В. Воробьев. – Новосибирск, 1964. – 22 с.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 8.08.2007

УДК 621.311.017

ОБ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Докт. техн. наук, проф. ФУРСАНОВ М. И, канд. техн. наук, доц. РАДКЕВИЧ В. Н.

Белорусский национальный технический университет

В научно-технических изданиях [1–6] были опубликованы критические материалы, связанные с анализом загрузки силовых трансформаторов электрических сетей и снижения потерь мощности и электроэнергии. Публикации можно было бы отнести к полезным и дискуссионным, если бы не весьма некорректный тон автора в отношении других исследований [7–10, 13, 14], в том числе проводимых на кафедре «Электроснабжение» [10], где он работает, и кафедре «Электрические системы» Белорусского

национального технического университета [7, 8]. В этой связи считаем целесообразным высказать свою точку зрения по поводу рассматриваемой проблемы в целом и упомянутых статей.

Одной из особенностей современных систем электроснабжения является многократная трансформация электрической энергии в процессе ее передачи и распределения. Поэтому суммарная установленная мощность трансформаторов в несколько раз превышает установленную мощность электростанций (в Республике Беларусь примерно в шесть раз). Отсюда – постоянное внимание исследователей к вопросам рационального конструирования и выбора оптимальной мощности трансформаторов при проектировании и особенно их эффективного использования в условиях эксплуатации на электростанциях, в электрических сетях энергосистем, промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства.

Эти вопросы нашли отражение в трудах многих ученых и специалистов, в том числе таких признанных авторитетов в области электроэнергетики, как В. М. Блок, И. А. Будзко, В. А. Козлов, М. С. Левин, А. И. Руцкий, А. А. Федоров и др.

С конструированием трансформаторов с улучшенными в отношении потерь параметрами теоретических проблем нет. Как верно отмечено в [9], при проектировании трансформатора можно получить практически любое соотношение между потерями холостого хода и короткого замыкания. Что же касается вопросов выбора и особенно эксплуатации трансформаторов, то здесь все гораздо сложнее, так как оптимальное решение в значительной степени будет зависеть от принятого критерия эффективности – минимума активных потерь мощности, электроэнергии или экономических показателей (приведенные или дисконтированные затраты, стоимость передачи электроэнергии и т. д.).

Вернемся, однако, к [1–6]. В наиболее выразительном виде точка зрения автора по данному вопросу изложена в [5], где он убедительно, на его взгляд, доказывает неправомерность использования критериев установления экономических зон работы трансформаторов, в которых фигурируют термины «удельные» или «относительные».

Речь идет о решении задачи в статической постановке, т. е. без учета фактора времени, когда ставится вопрос определения загрузки трансформатора на основе принятого критерия оптимальности – потерь мощности, КПД или экономического. При этом автор пытается сопоставлять несопоставимые (разные) критерии [5]:

- полные потери активной мощности

$$\sum \Delta P = k^2 \Delta P_{\text{мн}} + \Delta P_{\text{ст}}; \quad (1)$$

- удельные потери

$$\sum \Delta P_{\text{уд}} = \sum \frac{\Delta P}{k} = k \Delta P_{\text{мн}} + \frac{\Delta P_{\text{ст}}}{k}; \quad (2)$$

- полные приведенные затраты

$$Z = p_t K_t + (\Delta P_{ct} + \Delta P_{mn} k^2) T C; \quad (3)$$

• удельные затраты

$$Z_y = Z / S, \quad (4)$$

где k – коэффициент загрузки трансформатора; ΔP_{mn} и ΔP_{ct} – потери активной мощности соответственно в обмотках и стали; p_t – отчисления от капитальных вложений; K_t – стоимость трансформатора; T – годовое число часов работы трансформатора; C – расчетная стоимость 1 кВт·ч потерь электроэнергии; S – полная мощность нагрузки.

Далее полученные по приведенным формулам результаты сравниваются между собой. Совершенно не понятно, с какой целью это делается, поскольку и без всяких расчетов ясно – результаты будут разными и не сопоставимыми. Выражаясь терминологией автора, «разве нет оснований для укоризны».

Из изложенного следует, что речь идет о корректном применении критериев оптимальности, а не об их противопоставлении, поскольку каждый полученный результат будет в точности соответствовать своему критерию.

Рассмотрим вначале функцию (1), которая имеет минимум при $k = 0$. При этом минимальные потери мощности

$$\sum \Delta P_{\min} = \Delta P_{ct}. \quad (5)$$

Трансформатор работает на холостом ходу, достигнут минимум полных потерь активной мощности в трансформаторе, равный 100 % получаемой из сети мощности. С таким критерием можно было бы согласиться, если бы задача энергосистемы заключалась в минимизации полных потерь мощности. Однако она, как известно [11], состоит в отпуске качественной электрической энергии потребителям с наибольшей эффективностью, в данном случае – с наибольшим мгновенным КПД $\eta_{\Delta P}$, максимум которого достигается при коэффициенте загрузки трансформатора [15]

$$k_{\Delta P} = \sqrt{\frac{\Delta P_{ct}}{\Delta P_{mn}}}, \quad (6)$$

который как раз и соответствует минимуму относительных суммарных потерь активной мощности в трансформаторе [7, 8]:

$$\frac{\partial \sum \Delta P}{\partial k_{\Delta P}} = -\frac{\Delta P_{mn}}{k^2 \Delta P} + \Delta P_{ct} = 0. \quad (7)$$

При этом в зависимости от характеристик трансформаторов величина $k_{\Delta P}$ находится в диапазоне 0,42–0,6 [7].

Потери мощности – важный режимный показатель, однако не в полной мере характеризующий сеть с точки зрения эффективности передачи электрической энергии. Поэтому более правомерным по сравнению с $k_{\Delta P}$ в качестве критерия оптимальности решаемой задачи использовать КПД по

электроэнергии $\eta_{\Delta W}$ [9, 15] (годовой КПД), который определяется через отношение

$$\eta_{\Delta W} = \frac{W_2}{W_1}, \quad (8)$$

где W_1, W_2 – соответственно количество электроэнергии, полученной трансформатором из питающей сети и отданной им потребителям.

Количество полученной трансформатором электроэнергии

$$W_1 = W_2 + \Delta P_{\text{ст}} T + k^2 \Delta P_{\text{мн}} \tau, \quad (9)$$

где τ – время максимальных потерь.

Из условия

$$\frac{\partial \eta_{\Delta W}}{\partial k_{\Delta W}} = 0 \quad (10)$$

получаем

$$k_{\Delta W} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{ст}} T}{\Delta P_{\text{мн}} \tau}}. \quad (11)$$

Сопоставляя выражения (11) и (4.60) из [7, с. 95]), убеждаемся, что коэффициент загрузки, вычисленный по (11), в то же время соответствует и минимуму относительных суммарных потерь электрической энергии – одному из нормируемых показателей эффективности работы энергосистемы [11]. При этом норматив потерь устанавливается в относительных единицах [12, с. 10]. Как видно из (6), (11), значение $k_{\Delta W}$ в $\sqrt{T/\tau}$ раз больше $k_{\Delta P}$.

Однако при выборе трансформаторов основная технико-экономическая характеристика трансформатора – не потери, а приведенные затраты [13]. Они устанавливают оптимальное соотношение между конструкцией трансформатора и его рациональным использованием вследствие того, что учитывают как стоимость трансформатора, так и стоимости его обслуживания и потерь электрической энергии.

Следовательно, становится понятным, что во всех случаях коэффициент загрузки трансформатора должен определяться исходя из экономических соображений. При этом сразу же возникает вопрос – из каких? Определим коэффициент загрузки трансформатора $k_{\Delta Z}$, соответствующий максимуму экономического КПД $\eta_{\Delta Z}$, который выразим через отношение

$$\eta_{\Delta Z} = \frac{Z_2}{Z_1}, \quad (12)$$

где Z_1 и Z_2 – затраты на передачу электрической энергии на первичной и вторичной сторонах трансформатора.

Причем разность затрат

$$Z_1 - Z_2 = \Delta P_{\text{ст}} T \beta_{\text{ст}} + k_{\Delta Z}^2 \Delta P_{\text{мн}} \tau \beta_{\text{мн}}, \quad (13)$$

где $\beta_{\text{ст}}$ и $\beta_{\text{мн}}$ – стоимости 1 кВт·ч потерь электроэнергии соответственно холостого хода и нагрузочных.

Из $\frac{\partial \eta_{\Delta 3}}{\partial k_{\Delta 3}} = 0$ получаем

$$k_{\Delta 3} = \sqrt{\frac{p_{\tau} K_{\tau} + \Delta P_{\text{ст}} T \beta_{\text{ст}}}{\Delta P_{\text{мн}} \tau \beta_{\text{мн}}}}, \quad (14)$$

где p_{τ} – суммарный коэффициент отчислений от стоимости трансформатора K_{τ} .

Данное выражение характеризует максимум экономического КПД, минимум удельных приведенных затрат [13, с. 134, формула (5.5)], [9, формула (14)], [10, формула (4)] и минимум стоимости трансформации электрической энергии C_{τ} [7, с. 95, формула (4.70)]. Итак, полные приведенные затраты или стоимость, т. е. удельные затраты?

Никакого противопоставления здесь быть не должно, так как данные критерии не противоречат один другому, а дополняют друг друга.

Зависимости приведенных затрат от загрузки, построенные для различных номинальных мощностей трансформаторов, определяют пределы их рационального использования или экономические зоны (интервалы) нагрузки трансформаторов [7, 13, 14]. Такие зоны служат основой для выбора трансформаторов в условиях проектирования, а также для разработки оптимальных планов их замены в условиях эксплуатации электрических сетей [7] в процессе решения задачи в динамической постановке, т. е. с учетом фактора времени. И уже в [7, 13] было замечено, что использование трансформаторов во всей экономической зоне может потребовать их систематической перегрузки.

В современных эксплуатационных условиях, когда ставится вопрос о наивыгоднейшей нагрузке трансформатора данной номинальной мощности, нагрузка должна соответствовать наименьшей стоимости продукции, в данном случае – минимальной стоимости трансформации электрической энергии, а не каким-то частным критериям в виде потерь. При этом величина наивыгоднейшей нагрузки может быть больше экономической и составлять 140 % и более от номинальной мощности [7, 9, 13]. Это результаты доказательных теоретических исследований и расчетов, а не рекомендации для их практического применения, противоречащие инструкциям по эксплуатации трансформаторов заводов-изготовителей. Данный факт свидетельствует о том, что эффективное использование трансформаторов в наивыгоднейших режимах в современных условиях не представляется возможным – для этого необходимо конструирование и производство более дешевых трансформаторов с усиленной изоляцией и уменьшенными активными сопротивлениями. Определение наивыгоднейшей нагрузки трансформаторов (как впрочем проводов и кабелей) позволяет параллельно решать и другие задачи управления электрическими сетями [7]. Например, на основе сопоставления расчетных фактических и экономически обоснованных уровней потерь электроэнергии можно определять пути движения в сторону оптимума, ранжировать мероприятия по снижению потерь по степени эффективности и осуществлять стратегии их реализации на практике.

Ответим теперь на некоторые замечания автора. В [5] он пишет, что в [10] «величина коэффициента загрузки трансформатора, соответствующего минимуму удельных приведенных затрат», получена из формулы

полных приведенных затрат. Ничего подобного в [10] нет – там черным по белому написано «для выбора оптимального решения в качестве целевой функции следует использовать удельные приведенные затраты...». Это есть пример некорректного отношения автора. Далее в [1] он возражает против выводов [7, 8] о том, что для обеспечения оптимальной работы трансформаторов в условиях эксплуатации следует эксплуатировать их с перегрузками, например с нагрузками 154, 121 и 104 %. Ответ дан выше – расчетная наивыгоднейшая нагрузка трансформаторов может быть еще больше, однако никто не собирается рекомендовать эксплуатировать трансформаторы без учета их допустимой нагрузочной способности. Ссылка на рис. 3 в [1] сделана неверно. На самом деле рис. 3 приведен в [8], и речь в данной статье идет об отыскании наивыгоднейшей загрузки трансформатора в условиях эксплуатации с учетом стоимости нагрузочных потерь электроэнергии в линиях на пути от данного трансформатора до источника питания, а не об оптимизации потерь активной мощности, как о том пишет автор.

Результат исследования [8] – оптимальная загрузка трансформатора при учете названной составляющей стоимости будет тем меньше, чем дальше от источника питания подключен трансформатор.

В числитель выражения (3) в [1], а не в [2], как указывает автор, «добавка» в виде $p_n K_n$ не напрашивается, а она там должна быть. Однако в этом случае речь будет идти об оптимизации электрической сети, а не об определении «оптимального коэффициента загрузки» каждого трансформатора. Вызывает также сожаление малоубедительное утверждение [1] о том, что «применение силовых трансформаторов меньших номинальных мощностей всегда во всех отношениях выгоднее применения аналогичных трансформаторов с большими номинальными мощностями», а следовательно, не требуется проводить сложных математических расчетов для обоснования замены трансформаторов. В реальности все должно решаться на основе технико-экономического обоснования с учетом динамики электрических нагрузок, конкретных характеристик и условий эксплуатации силовых трансформаторов. Указанные замечания свидетельствуют о недостаточном понимании автором проблемы в целом, состоящей в выработке обоснованной стратегии управления режимными и топологическими параметрами сетей в направлении движения к оптимуму – минимуму стоимости передачи электрической энергии. Для этой цели разработана целая методология поэтапной оптимизации электрических сетей с целью «приближения» к оптимальным условиям функционирования сетей и, как следствие – к наивыгоднейшей загрузке оборудования энергосистемы (генераторов, линий, трансформаторов и т. д.) и оптимальному уровню потерь [7]. При этом не отвергаемая частная задача снижения ΔP , связанная с уменьшением активных сопротивлений элементов сетей, будет только способствовать достижению оптимального состояния электрических сетей при решении эксплуатационных задач как в статической, так и в динамической постановках.

ВЫВОДЫ

1. Рассматриваемые проблемы минимизации полных потерь активной мощности и приведенных затрат [1–6] корректны с математической точки

зрения, однако лишены практического смысла, так как противоречат основной задаче электроэнергетической системы – бесперебойному обеспечению потребителей качественной электроэнергией.

2. Исследования многих авторов показывают, что экономические (рациональные) зоны эксплуатации трансформаторов существуют и характеризуются зависимостями приведенных затрат от нагрузки.

3. Проектирование силовых трансформаторов со сниженными значениями потерь холостого хода и активных сопротивлений обмоток будет способствовать более эффективному использованию трансформаторов.

4. Наивыгоднейший режим работы трансформатора соответствует минимуму стоимости трансформации электрической энергии, которая является удельным экономическим показателем.

5. Задача определения наивыгоднейшего использования любого оборудования энергосистемы может быть качественно решена только в процессе оптимизации электрической сети в целом по экономическому критерию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончар, А. А. О поиске зон оптимальной работы асинхронных двигателей и трансформаторов / А. А. Гончар // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2007. – № 4. – С. 23–28.
2. Гончар, А. А. Максимум коэффициента полезного действия и минимум потерь в трансформаторе / А. А. Гончар // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1991. – № 7. – С. 43–45.
3. Гончар, А. А. О критериях оптимизации работы силового трансформатора / А. А. Гончар // Энергия и Менеджмент. – 2004. – № 2(17). – С. 45.
4. Гончар, А. А. О максимуме КПД силового трансформатора / А. А. Гончар // Энергия и Менеджмент. – 2005. – № 1(22). – С. 45.
5. Гончар, А. А. О попытках использовать искусственные критерии для обоснования существования зон экономичной работы силового трансформатора / А. А. Гончар // Энергия и Менеджмент. – 2005. – № 3(24). – С. 52–53.
6. Гончар, А. А. О критериях оптимизации работы силового трансформатора / А. А. Гончар // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 1. – С. 26–30.
7. Фурсанов, М. И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М. И. Фурсанов. – Минск: УВИЦ при УП «Белэнергосбережение». – 2005. – 207 с.
8. Фурсанов, М. И. Теоретические основы обеспечения оптимальных уровней потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М. И. Фурсанов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2005. – № 6. – С. 5–13.
9. Рахимов, К. Р. Об оптимальной загрузке силовых трансформаторов / К. Р. Рахимов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1990. – № 1. – С. 44–48.
10. Радкевич, В. Н. О выборе критерия оптимизации работы силового трансформатора / В. Н. Радкевич, А. Л. Трушников // Энергия и Менеджмент. – 2004. – № 4–5. – С. 19–20.
11. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей / Министерство энергетики и электрификации СССР. – 14-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.
12. Нормирование и снижение потерь электрической энергии в электрических сетях: сб. док. – М.: Диалог-электро, 2007. – 124 с.
13. Козлов, В. А. Электроснабжение городов / В. А. Козлов. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1977. – 280 с.
14. Блок, В. М. Электрические сети и системы: учеб. пособие для электроэнерг. спец. вузов / В. М. Блок. – М.: Высш. шк., 1986. – 430 с.
15. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.

Представлена кафедрой

электрических систем

Поступила 21.11.2007