

ВЫВОДЫ

1. Разработан алгоритм формирования матрицы уравнения состояния монотонных цепей, который сводится к следующему:

а) в монотонной $L(C)$ -цепи выделяется произвольное R -дерево (дополнение). Отсутствие R -дерева (дополнения) в монотонной $L(C)$ -цепи означает, что нарушено условие независимости токов (напряжений) в индуктивностях (емкостях);

б) составляется матрица контурных сопротивлений (сечений проводимостей) для полученной системы независимых контуров (сечений) закодированием индуктивностей (размыкание емкости) в ветвях дополнения (дерева);

в) исключаются те контуры (сечения), контурные токи (напряжение сечений) которых не являются индуктивными токами (емкостными напряжениями), и получается эквивалентная матрица контурных токов (проводимостей сечений);

г) составляется уравнение состояния цепи $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X}$, где $\mathbf{X}$ – вектор токов в индуктивностях (напряжений на емкостях); $\mathbf{A} = -\mathbf{L}_d\mathbf{R}_3$; $\mathbf{A} = -\mathbf{C}_d\mathbf{G}_3$; $\mathbf{L}_d(\mathbf{C}_d)$ – диагональная матрица индуктивностей (емкостей); $\mathbf{R}_3(\mathbf{G}_3)$ – эквивалентная матрица контурных сопротивлений (проводимостей сечений).

2. Показано, что собственные числа несимметричной матрицы уравнений состояний для монотонной цепи действительные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дезоер, Ч. А. Основы теории цепей / Ч. А. Дезоер, Э. С. Ку. – М.: Связь, 1976. – 286 с.
2. Гантмахер, Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – М.: Наука, 1967. – 575 с.

Представлена Ученым советом

Поступила 5.05.2006

УДК 621.311.017

О ПОИСКЕ ЗОН ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ТРАНСФОРМАТОРОВ

Канд. техн. наук, доц. ГОНЧАР А. А.

Белорусский национальный технический университет

В литературе по электротехнике появляются материалы, посвященные поискам зон оптимальной загрузки одних из основных элементов систем электроснабжения – силовых трансформаторов и асинхронных двигателей [1–9].

Цель настоящей публикации – критическая оценка используемых методик, а также некоторые комментарии к результатам и рекомендациям, полученным на основании принятых ими методик. Означенные поиски «оптимумов» по разным критериям прежде всего связаны с величиной сум-

марных потерь мощности в элементах систем электроснабжения. Для достижения поставленных целей, казалось бы, необходимо и достаточно исследовать на минимум функцию суммарных потерь мощности и в дальнейшем руководствоваться полученными результатами. Однако авторы не идут таким путем. Вместо этого одни из них ошибочно считают, что минимуму суммарных потерь мощности соответствует такая нагрузка, которой соответствует максимум КПД. Внимательное же рассмотрение этого вопроса показывает, что это противоречит постановке вопроса при исследованиях на экстремум функции КПД от загрузки, а также не учитывается фактический характер изменения как потерь мощности, так и КПД.

В других случаях в качестве критерия широко применяется минимум удельных потерь мощности (относительных потерь). Использование этого критерия приводит к тому же результату, что и в первом случае, как только осуществим необходимый переход от удельных потерь к полным, именованным. Кстати, никто из авторов не делает такого перехода.

«Основоположниками» подобного пути в исследованиях, видимо, необходимо признать [1, 2]. В [1] отмечалось, что «они ограничивались решением более узкой задачи нахождения такого коэффициента нагрузки, который соответствовал бы минимуму потерь активной мощности в самом двигателе».

Как известно, эта задача решается путем нахождения максимума функции $\eta = f(\beta)$, где η – КПД двигателя при нагрузке P на валу; $\beta = \frac{P}{P_n}$ – коэффициент загрузки асинхронного двигателя; P_n – номинальная мощность двигателя. Приравняв к нулю производную $\frac{d\eta}{d\beta}$, находим оптимальный коэффициент загрузки

$$\beta'_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{\Delta p_0}{\Delta p_{\text{vh}}}} = \sqrt{\gamma}, \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{\Delta p_0}{\Delta p_{\text{vh}}}$ – так называемое отношение потерь; Δp_0 – потери активной мощности на холостом ходу двигателя; Δp_{vh} – потери активной мощности в двигателе при номинальной (паспортной) мощности P_n .

Обычно таким образом доказывается, что при наиболее часто встречающихся у асинхронных двигателей значениях $\gamma \cong 0,35-0,5$ оптимальный коэффициент загрузки значительно меньше единицы и варьируется в относительно узком диапазоне – между 0,6 и 0,7».

Давая расширенное толкование полученному результату, автор [1] ошибочно полагал, что при нагрузках в соответствии с (1) будет минимум потерь активной мощности в двигателе, и безосновательно наделял это выражение словом «оптимальный». Фактически же минимума потерь активной мощности, как и оптимального коэффициента загрузки, нет. Выражение (1) в соответствии с поставленной задачей по исследованию функции $\eta = f(\beta)$ на максимум нужно толковать только следующим образом. Коэффициент загрузки асинхронного двигателя (как и силового трансформато-

ра), соответствующий максимуму КПД, определяется из условия равенства переменных потерь активной мощности постоянным.

На основании опыта, а также анализа состава суммарных потерь активной мощности их минимум соответствует холостому ходу. Это в равной степени касается как асинхронных двигателей, так и трансформаторов.

Как следует из принципа действия асинхронного двигателя, величина удельных реактивных нагрузок будет тем меньше, чем больше нагрузки на его валу.

И что характерно, как авторы [1, 2], опубликовавшие более 50 лет назад свои идеи, так и их последователи не предпринимают попыток подтвердить каким-либо образом истинность своих рекомендаций. Аргументы, положенные в основу их исследований, как правило, противоречивы, следовательно, полученные результаты практически невозможно или трудно истолковать на нынешнем уровне знаний в области электротехники.

Но есть и рекомендации [3], в которых в одном из промежуточных выводов констатируется, что для обеспечения оптимальной работы трансформаторов необходимо эксплуатировать их длительное время (время наибольших потерь $\tau = 1500$ ч) для номинальных мощностей 100; 160; 250 кВ·А соответственно с нагрузками 154; 121 и 104 %.

Таким образом, для достижения рекомендаций [3] необходимо длительное время эксплуатировать силовой трансформатор с коэффициентом загрузки $k = 1,54$ и соответственно активными потерями мощности в нем в $(1,54)^2$ раза большими, чем составляют нагрузочные потери в том же трансформаторе при номинальной нагрузке ($k = 1,0$).

В более ранних публикациях [4] отмечалось: «Показано, что для выпускаемых в настоящее время трансформаторов оптимальный максимальный коэффициент загрузки трансформаторов по экономическому критерию составляет 1,43–2,23».

Смелые рекомендации, особенно для тех исследователей и эксплуатационников, которые до сих пор считали и считают, что чем меньше потери активной мощности в каждом элементе сети и системы в целом (чем меньше коэффициент загрузки), тем лучше во всех отношениях.

Рекомендации [3, 4] без дополнительных обоснований, связанных с сокращением сроков службы трансформаторов, входят в резкое противоречие с рекомендациями заводов-изготовителей, которые устанавливают в своих технических условиях по эксплуатации трансформаторов очень жесткие требования как по величине перегрузок, с одной стороны, так и их продолжительности, с другой. Исследователи уделяют большое внимание силовому трансформатору [5–9]. Это, видимо, оправдано, так как трансформаторы составляют неотъемлемую часть электрических сетей и систем электроснабжения промышленных предприятий. В меньшей мере уделено внимание асинхронным двигателям [1, 2]. Как правило, большинство цитируемых авторов в попытках обоснования существования «так называемых зон экономической работы силового оборудования» вынуждены привлекать искусственные критерии оптимизации, которые не вытекают напрямую из исследования соответствующих функций на экстремум. Это, например, минимум удельных потерь активной мощности, минимум

удельных приведенных затрат и т. д. При этом еще раз следует заметить, что привлечение к исследованию таких критериев не подтверждается элементарными доказательствами ожидаемых выгод от их применения.

Чтобы прояснить создавшуюся ситуацию и понять о чем идет речь, исключим из рассмотрения сложные теоретические рассуждения и в качестве примера возьмем за основу рис. 3 [8]. Указанный рисунок представляет собой распределительную линию 10 кВ, состоящую из трех последовательно соединенных участков воздушных линий, выполненных проводами соответственно марок А-50, А-35 и А-25 длиной 1 км каждый. К концу линии А-25 подключены три трансформатора с номинальными мощностями 100; 160 и 250 кВ·А (рис. 1).

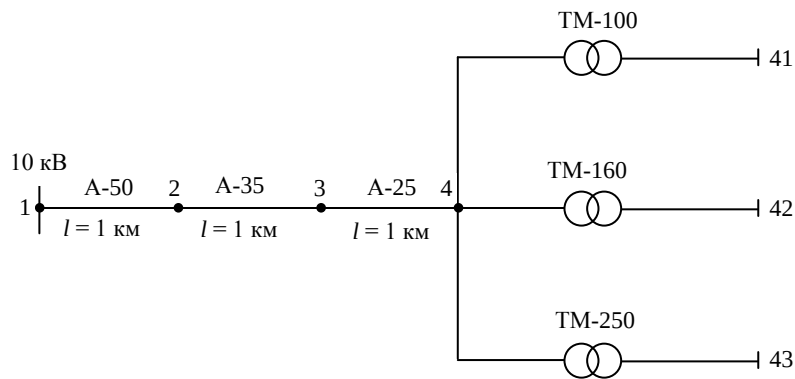


Рис. 1. Схема распределительной линии 10 кВ

Не составит большого труда для одной фазы каждого трансформатора с током нагрузки I рассчитать потери активной мощности в токопроводящих цепях

$$\Delta p = I^2 R, \quad (2)$$

где R – сумма активных сопротивлений последовательно включенных элементов сети (трансформаторы, воздушные и кабельные линии, реакторы и т. д.); I – ток, протекающий по указанным элементам и участкам сети, величина которого при прочих равных условиях определяется исключительно потребителем. При сохранении неизменными элементов сети и ее конфигурации следует считать $R = \text{const}$.

Отсюда возникает вопрос: о какой оптимизации потерь активной мощности может идти речь в выражениях вида (2) и какие теоретические обоснования и математический аппарат для этого необходимо привлечь?

На основании (15) из [3] оптимальную загрузку каждого трансформатора $k_{\text{ст}}$ рекомендуется определять по выражению

$$k_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{p_{\text{т}} k_{\text{т}} + \Delta p_{\text{х}} T \beta_{\text{х}}}{\Delta p_{\text{к}} \tau_{\text{т}} \beta_{\text{н}} + \sum \frac{S_{\text{НОМ}}^2}{U^2} r_{\text{ли}} \tau_{\text{ли}} \beta_{\text{ни}}}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{т}}$ – стоимость трансформаторов подстанций; $p_{\text{т}}$ – суммарный коэффициент отчислений от $k_{\text{т}}$; $\Delta p_{\text{х}}$, $\Delta p_{\text{к}}$ – потери мощности холостого хода и ко-

роткого замыкания трансформатора; $T = 8760$ ч – время подключения трансформатора к сети; τ_t, τ_{li} – время использования максимальной нагрузки трансформатора и линий; $\beta_n, \beta_{ni}, \beta_x$ – стоимость 1 кВт·ч нагрузочных потерь и холостого хода; $S_{ном}$ и U – соответственно номинальные мощность и напряжение трансформатора; r_{li} – активное сопротивление участка линии.

По структуре построения (2) логически напрашивается «добавка» в числитель подкоренного выражения составляющей $p_l k_l$, где p_l – суммарный коэффициент отчислений от стоимости линии k_l . Правда, это еще больше увеличит «оптимальный коэффициент загрузки» каждого трансформатора по сравнению с исходным выражением.

Теория, положенная в основу выражений типа (15) из [3], заключается в том, что, по мнению ее авторов, что-то оптимальное в элементе электрической цепи наступает при равенстве чего-то постоянного (допустим постоянных потерь активной мощности трансформатора) чему-то переменному (переменным потерям активной мощности того же трансформатора). Она вызывает возражение, правда, единственное: она не верна. Полученные на их основе результаты не согласуются с опытом, противоречат законам математики и не выдерживают элементарного критического разбора. Об этом прямо или косвенно утверждается в [10–14].

Если же действительно по каким-либо причинам возникает вопрос об уменьшении Δp , то в соответствии с (2) необходимо уменьшать R , так как других путей нет. Для этого необходимо заменять все элементы (или часть элементов) электрических сетей и электрооборудования (трансформаторы, кабели, провода ЛЭП, реакторы и т. д.), ибо в настоящее время нет способов (разве что перевод этих элементов сети в сверхпроводящее состояние) существенного физического изменения параметров, допустим, увеличения площади поперечного сечения проводниковых материалов, кроме как их замена проводниками с большими площадями поперечного сечения. Для оценки эффективности принятых решений, на наш взгляд, достаточно применения хорошо зарекомендовавшего себя и проверенного временем метода приведенных затрат.

Что касается решения вопросов только замены слабо загруженных трансформаторов, как это сформулировано в [8], то здесь все просто и предсказуемо. Общеизвестно, что при прочих равных условиях применение силовых трансформаторов меньших номинальных мощностей всегда во всех отношениях выгоднее применения аналогичных трансформаторов с большими номинальными мощностями. Это касается габаритов, стоимости, потерь в стали и обмотках и т. д.

При этом сложных математических расчетов проводить не надо.

Учет стоимости демонтажа старого оборудования, монтажа и стоимости нового, фиксированных значений номинальных мощностей трансформаторов и стандартных сечений проводов ЛЭП и кабелей могут нивелировать ожидаемый эффект от реконструкции.

ВЫВОДЫ

1. В основу поиска зон оптимальной загрузки асинхронных двигателей и трансформаторов авторами [1–8] положен ошибочный тезис, заключающийся в том, что максимуму коэффициента полезного действия якобы соответствует минимум потерь активной мощности, энергии и т. д. в них. Фактически это не так, такие зоны не существуют. В итоге – маловразумительные результаты, противоречащие опыту и здравому смыслу.

2. Сказанное в равной мере относится и к оценке итогов исследований при использовании в качестве критерия для поиска зон оптимальной загрузки со словами «удельные» (относительные) потери мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвак, Л. В. К вопросу снижения удельных реактивных нагрузок асинхронных двигателей / Л. В. Литвак // Труды научно-технического совещания по повышению коэффициента мощности. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1953. – С. 109–122.
2. Шишкин, О. П. Итоги применения синхронизации асинхронных двигателей на предприятиях нефтяной промышленности / О. П. Шишкин // Труды научно-технического совещания по повышению коэффициента мощности. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1953. – С. 241–247.
3. 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.
4. Фурсанов, М. И. Методология и практика определения и анализа потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем: автореф. дис. ... докт. техн. наук, 05.14.02 / М. И. Фурсанов. – Минск: БНТУ, 2002.
5. Свечарник, Д. В. Резервы повышения эффективности трансформаторов / Д. В. Свечарник, Д. Г. Нерешелашвили // Промышленная энергетика. – 1988. – № 6. – С. 21–26.
6. Рахимов, К. Р. Об оптимальной нагрузке силовых трансформаторов / К. Р. Рахимов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1990. – № 1. – С. 44–48.
7. Анчарова, Т. В. Экономия электроэнергии на промышленных предприятиях / Т. В. Анчарова, С. И. Гамазин, В. В. Шевченко. – М.: Высш. шк., 1990.
8. 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.
9. Заугольников, В. Ф. Некоторые аспекты экономичной работы силовых трансформаторов / В. Ф. Заугольников, А. А. Балабин, А. А. Савинков // Промышленная энергетика. – 2006. – № 4. – С. 10–14.
10. Гончар, А. А. Максимум коэффициента полезного действия и минимум потерь в трансформаторе / А. А. Гончар // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений СССР). – 1991. – № 7. – С. 43–45.
11. Гончар, А. А. О критериях оптимизации работы силового трансформатора / А. А. Гончар // Энергия и менеджмент. – 2004. – № 2 (17). – С. 45.
12. Гончар, А. А. О максимуме КПД силового трансформатора / А. А. Гончар // Энергия и менеджмент. – 2005. – № 1 (22). – С. 45.
13. 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.
14. 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.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 30.03.2007