

УДК 621.311.16

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО УСЛОВИЮ МИНИМАЛЬНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ

Канд. техн. наук, доц. РАДКЕВИЧ В. Н., асп. ТРУШНИКОВ А. Л.

*Белорусский национальный технический университет*

Электроснабжение электроприемников промышленных предприятий напряжением до 1 кВ, как правило, осуществляется через одно- и двухтрансформаторные подстанции 6–10/0,4 кВ. Основным принципам построения рациональной схемы электроснабжения в наибольшей степени удовлетворяет система двухтрансформаторных подстанций с двумя питающими линиями с применением секционирования на вторичном напряжении (рис. 1а, б) [1]. При этом на вторичной стороне может быть предусмотрена параллельная или раздельная работа силовых трансформаторов. Параллельная работа (рис. 1а) по экономическим соображениям является предпочтительной. Однако в большинстве случаев в основном из-за необходимости ограничения токов короткого замыкания трансформаторы работают раздельно (рис. 1б) на определенную часть общей нагрузки. При использовании однострансформаторных подстанций резервирование электроснабжения осуществляется с помощью перемычек между соседними подстанциями, выполненными кабелями или шинопроводами (рис. 1в).

Важным мероприятием по снижению потерь мощности и электроэнергии, а также по повышению коэффициента мощности  $\cos\varphi$  являются своевременное отключение, вывод в резерв трансформаторов при снижении их нагрузок на достаточно длительный период и включение трансформаторов при росте нагрузок. Такие изменения нагрузок могут быть обусловлены производственными причинами (уменьшение поставок сырья, трудностями реализации продукции, изменением технологии производства, реконструкцией производственных установок и т. п.), сезонным характером электрических нагрузок (предприятия по переработке сельхозпродукции, торфодобытки, асфальтобетонные заводы и т. п.) и др.

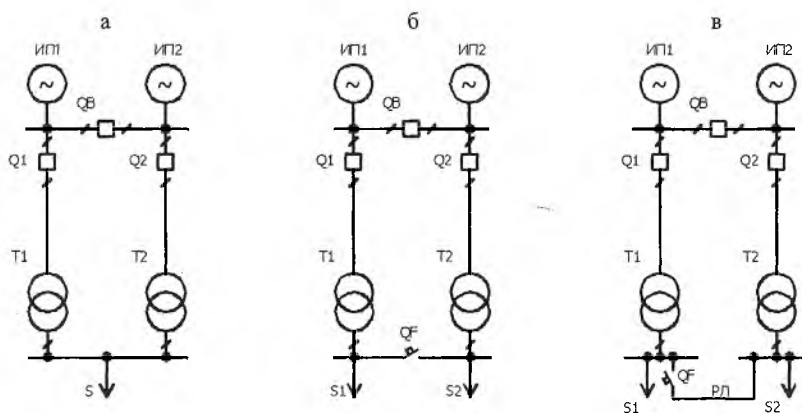


Рис. 1. Принципиальные схемы электроснабжения с одно- и двухтрансформаторными подстанциями: а – при параллельной работе трансформаторов; б – то же раздельной; в – раздельной работе с резервной линией (РЛ); ИП – источник питания

Естественно, вывод в резерв трансформатора должен осуществляться после перевода его нагрузки на другие работающие трансформаторы. Для ответственных электроприемников должны быть предусмотрены устройства автоматического включения резерва (АВР) на напряжении до 1 кВ. Преднамеренные отключения трансформаторов с целью экономии энерго-ресурсов не должны отрицательно сказываться на надежности электро-снабжения потребителей электроэнергии.

Для определения целесообразности отключения одного из трансформаторов, работающих на общую нагрузку, необходимо использовать критерий оптимальности [2, 3]. Такими критериями могут быть минимум потерь мощности или электроэнергии за рассматриваемый период.

Рассмотрим критерий минимальных потерь мощности более подробно.

Определим, при какой ожидаемой электрической нагрузке трансформатора целесообразно его отключить, используя в качестве критерия оптимальности минимум потерь активной мощности.

Для трансформаторов, имеющих одинаковую номинальную мощность  $S_{ном}$  и работающих параллельно на общую нагрузку, условием равенства потерь активной мощности при включении  $n$  и  $(n - 1)$  трансформаторов является выражение [1]

$$S_{\Delta P} = S_{ном} \sqrt{n(n-1) \frac{\Delta P_x}{\Delta P_k}}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_x$  и  $\Delta P_k$  – потери холостого хода и короткого замыкания трансформатора.

Следовательно, при  $S < S_{\Delta P}$  потери активной мощности в  $(n - 1)$  трансформаторе будут меньше, чем в  $n$  трансформаторах, а при  $S > S_{\Delta P}$  – наоборот. Этим условием можно пользоваться для ориентировочной оценки целесообразности отключения или включения одного из трансформаторов.

В случае использования двухтрансформаторных подстанций

$$S_{\Delta P} = S_{ном} \sqrt{\frac{2\Delta P_x}{\Delta P_k}}. \quad (2)$$

Так как у трансформаторов 6–10/0,4 кВ отношение  $\Delta P_x/\Delta P_k = 0,14 - 0,27$ , то для них  $S_{\Delta P} = (0,53 - 0,73)S_{ном}$ .

Для трансформаторов, имеющих нагрузку, должны соблюдаться следующие ограничения:

$$\begin{aligned} S_i &\leq \beta_i S_{ном i}; \\ \Theta_{Ti} &\leq \Theta_{Тдоп i}, \quad i = \overline{1, n}; \\ V_j &= \pm 0,05 U_{ном}, \quad j = \overline{1, k}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $S_i$  – полная мощность нагрузки  $i$ -го трансформатора;  $\beta_i$  – коэффициент допустимой загрузки  $i$ -го трансформатора;  $S_{ном i}$  – номинальная мощность  $i$ -го трансформатора;  $\Theta_{Ti}$  – температура нагрева  $i$ -го трансформатора при нагрузке  $S_i$ ;  $\Theta_{Тдоп i}$  – допустимая температура нагрева  $i$ -го трансформатора в заданных условиях эксплуатации;  $V_j$  – отклонение напряжения на зажимах

$j$ -го электроприемника, питающегося от  $i$ -го трансформатора в нормальном режиме;  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение сети;  $k$  – количество присоединенных электроприемников.

При раздельной работе трансформаторов (рис. 1б) и для однострансформаторных подстанций (рис. 1в) выражение (1) имеет ограниченную пригодность, так как в условиях эксплуатации технически сложно, а иногда и невозможно, обеспечить одинаковую нагрузку трансформаторов. В этом случае суммарная нагрузка двух трансформаторов (при незначительно различающихся значениях коэффициента мощности) может быть выражена как

$$S = S_1 + S_2, \quad (4)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – полная мощность нагрузки на шинах до 1 кВ трансформаторов Т1 и Т2.

На величину суммарных потерь мощности в трансформаторах оказывает влияние соотношение нагрузок  $S_1$  и  $S_2$ . Определим, при какой нагрузке  $S_1$  трансформатора Т1 его целесообразно отключить для уменьшения потерь мощности. Потери активной мощности при работе одного трансформатора (Т1 или Т2) с нагрузкой  $S$  могут быть определены:

$$\Delta P_1 = \Delta P_x + \Delta P_k \frac{(S_1 + S_2)^2}{S_{\text{ном}}^2}, \quad S_1 + S_2 \leq S_{\text{ном}}. \quad (5)$$

Выражение (5) представим в следующем виде:

$$\Delta P_1 = \Delta P_x + \Delta P_k \frac{S_1^2}{S_{\text{ном}}^2} + \Delta P_k \frac{S_2^2}{S_{\text{ном}}^2} + \Delta P_k \frac{2S_1 S_2}{S_{\text{ном}}^2}. \quad (6)$$

В случае использования двух трансформаторов суммарные потери в них составят

$$\Delta P_2 = 2\Delta P_x + \Delta P_k \frac{S_1^2}{S_{\text{ном}}^2} + \Delta P_k \frac{S_2^2}{S_{\text{ном}}^2}. \quad (7)$$

Приравняв выражения (6) и (7) и выполнив соответствующие преобразования, получим

$$2\Delta P_k S_1 S_2 = \Delta P_x S_{\text{ном}}^2. \quad (8)$$

Выразим нагрузку второго трансформатора в виде  $S_2 = S - S_1$  и подставим ее в формулу (8)

$$2\Delta P_k S_1 (S - S_1) = \Delta P_x S_{\text{ном}}^2. \quad (9)$$

Из выражения (9) получим квадратное уравнение

$$S_1^2 - SS_1 + \frac{\Delta P_x S_{\text{ном}}^2}{2\Delta P_k} = 0. \quad (10)$$

Уравнение второй степени имеет действительное решение при условии

$$D = \frac{\Delta P_x S_{\text{НОМ}}^2}{2\Delta P_K} - \frac{S^2}{4} \leq 0. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что решение поставленной задачи имеет смысл при суммарной нагрузке

$$S \geq S_{\text{НОМ}} \sqrt{\frac{2\Delta P_x}{\Delta P_K}}. \quad (12)$$

Правая часть выражения (12) представляет собой общую мощность нагрузки, при которой и выше которой (в допустимых пределах) существуют нагрузки  $S_1$  и  $S_2$ , обеспечивающие равенство суммарных потерь в случае работы одного и двух трансформаторов.

Если  $S < S_{\text{НОМ}} \sqrt{\frac{2\Delta P_x}{\Delta P_K}}$ , то с целью снижения потерь активной мощности целесообразна работа на одном трансформаторе.

Результатом решения квадратного уравнения (10) относительно  $S_1$  являются два действительных корня:

$$S_{1(1)} = \frac{S}{2} + \sqrt{\frac{S^2}{4} - \frac{\Delta P_x S_{\text{НОМ}}^2}{2\Delta P_K}}, \quad (13)$$

$$S_{1(2)} = \frac{S}{2} - \sqrt{\frac{S^2}{4} - \frac{\Delta P_x S_{\text{НОМ}}^2}{2\Delta P_K}}. \quad (14)$$

Таким образом, для уменьшения потерь активной мощности при нагрузке трансформатора Т1  $S_1 > S_{1(1)}$  целесообразно отключить трансформатор Т2, а при  $S_1 < S_{1(2)}$  – трансформатор Т1.

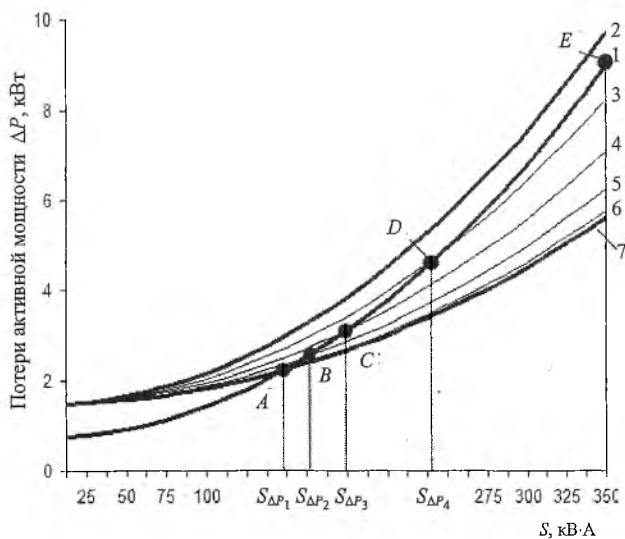


Рис. 2. Изменение потерь мощности в трансформаторах при неравномерном распределении нагрузок

Для иллюстрации на рис. 2 показана зависимость суммарных потерь активной мощности от полной нагрузки  $S$  для трансформаторов 10/0,4 кВ

типа ТМ номинальной мощностью  $S_{\text{ном}} = 250$  кВ·А. При этом рассмотрена работа одного (кривая 1) и двух трансформаторов при процентном соотношении их нагрузок 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 и 50:50 (кривые 2, 3, 4, 5, 6 и 7 соответственно).

Графические зависимости показывают, что при суммарной нагрузке потребителей  $S$  менее значения  $S_{\Delta P_1}$ , определяемой координатой точки  $A$ , целесообразна работа одного трансформатора. Если  $S > S_{\Delta P_1}$ , то меньшие потери активной мощности могут быть как при работе одного, так и двух трансформаторов. При неодинаковой нагрузке трансформаторов мощности, соответствующие равенству потерь при работе одного и двух трансформаторов ( $S_{\Delta P_2}$ ,  $S_{\Delta P_3}$ ,  $S_{\Delta P_4}$ ), увеличиваются с ростом неравномерности распределения нагрузок.

Так как нагрузки трансформаторов, минимизирующие потери активной и реактивной мощности, не всегда совпадают, то при определении оптимального числа работающих трансформаторов иногда пользуются так называемыми приведенными потерями холостого хода  $\Delta P'_x$  и короткого замыкания  $\Delta P'_k$  трансформатора [1]:

$$\Delta P'_x = \Delta P_x + K_{\text{ин}} \frac{I_x S_{\text{ном}}}{100}; \quad (15)$$

$$\Delta P'_k = \Delta P_k + K_{\text{ин}} \frac{U_k S_{\text{ном}}}{100}, \quad (16)$$

где  $K_{\text{ин}}$  – коэффициент изменения потерь, кВт/квар;  $I_x$  – ток холостого хода трансформатора, %;  $U_k$  – напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Коэффициент  $K_{\text{ин}}$  учитывает величину дополнительных потерь активной мощности при передаче реактивной мощности от источника питания до трансформатора.

В этом случае в формулах (1), (2) и (13), (14) вместо  $\Delta P_x$  и  $\Delta P_k$  используется  $\Delta P'_x$  и  $\Delta P'_k$ . Однако при электроснабжении потребителей от крупной энергосистемы с множеством источников питания оценить значение  $K_{\text{ин}}$  можно весьма приближенно, что ограничивает применение данного подхода при выборе числа работающих трансформаторов.

Выражения (1), (2), (13), (14) могут служить для ориентировочной оценки целесообразности изменения числа работающих трансформаторов для снижения потерь мощности. Окончательное решение должно приниматься с учетом режима работы системы электроснабжения в целом и надежности электрических потребителей.

## ВЫВОДЫ

1. Получены математические выражения, позволяющие определять количество трансформаторов, работающих параллельно или раздельно на общую нагрузку, обеспечивающую минимальные потери мощности.

2. При неодинаковой загрузке взаимно резервируемых трансформаторов существует электрическая нагрузка, при которой целесообразно изме-

нение числа работающих трансформаторов с целью снижения потерь мощности. Величина этой нагрузки зависит от степени неравномерности загрузки трансформаторов в исходном режиме.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров А. А., Каменева В. В. Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.
2. Гончар А. А. О критериях оптимизации работы силового трансформатора // Энергия и менеджмент. – 2004. – № 2. – С. 45.
3. Радкевич В. Н., Трушников А. Л. О выборе критерия оптимизации работы силового трансформатора // Энергия и менеджмент. – 2004. – № 4-5. – С. 32-33.

Представлена кафедрой  
электроснабжения

Поступила 30.05.2005

УДК 621.314

### О КРИТЕРИЯХ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА\*

Канд. техн. наук, доц. ГОНЧАР А. А.

*Белорусский национальный технический университет*

Поводом для написания данной статьи послужило несогласие автора с некоторыми принципиальными положениями, изложенными в ряде публикаций [1, 2], где трактуются вопросы об оптимальной загрузке силового трансформатора. Критериями оптимальности для определения зон экономичной эксплуатации трансформатора авторами приняты: минимум суммарных потерь активной мощности, минимум суммарных потерь электроэнергии в нем и т. д. Какие-либо существенные подтверждения истинности выдвинутых положений не приводятся. Их экспертиза на самом элементарном уровне не проводилась, в то время как в наличии – обширный арсенал доказательств противоположного.

Задачей научного исследования, как известно, являются поиск новых знаний, выявление новых закономерностей, получение возможно ожидаемых, возможно непредсказуемых результатов. К новым знаниям следует отнести, видимо, и неожиданное толкование ранее известных фактов. Однако во всех случаях полученные результаты должны быть правильным образом истолкованы и объективно объяснены.

Апробирование полученных результатов предполагает в том числе их сопоставление с фактами и закономерностями, которые не опровергнуты с течением времени и рассмотрены во всех аспектах и со всех точек зрения

---

\* Статья публикуется в порядке обсуждения.