

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО УСЛОВИЮ МИНИМУМА ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

А.Л. ТРУШНИКОВ, В.Н. РАДКЕВИЧ

Учреждение образования «Белорусский национальный технический университет», Республика Беларусь

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. 1, а, б). При этом, на вторичной стороне может быть предусмотрена параллельная или раздельная работа силовых трансформаторов. Параллельная работа (рис. 1, а) по экономическим соображениям является более предпочтительной. Однако в большинстве случаев, трансформаторы работают раздельно (рис. 1, б) на определенную часть общей нагрузки.

При использовании однострансформаторных подстанций резервирование электроснабжения осуществляется с помощью перемычек между соседними подстанциями, выполненными кабелями или шинопроводами (рис. 1, в).

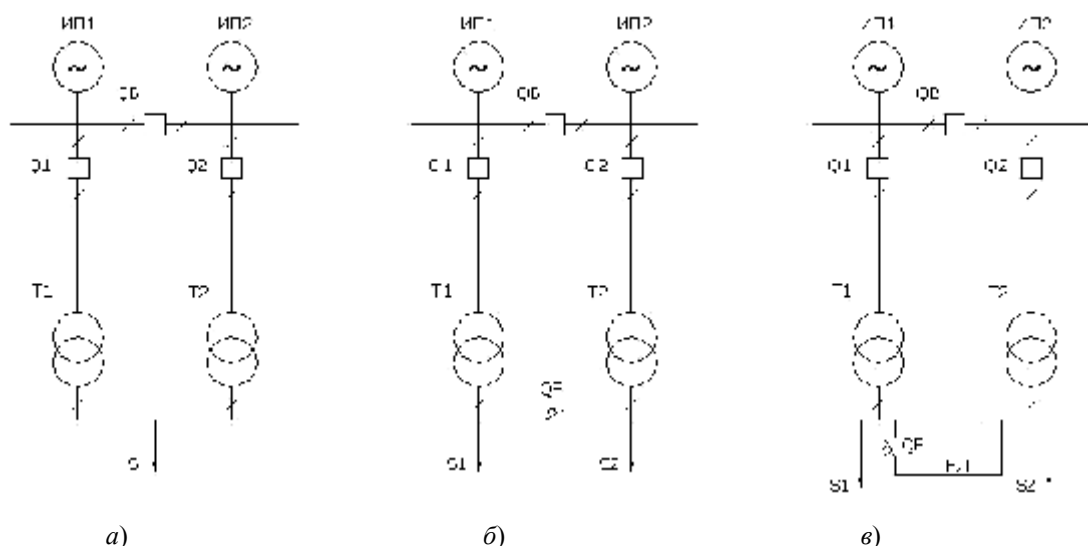


Рис. 1. Принципиальные схемы электроснабжения с одно- и двухтрансформаторными подстанциями: а – при параллельной работе трансформаторов; б – при раздельной работе трансформаторов; в – при однострансформаторных подстанциях с резервной линией (РЛ); ИП – источник питания

Важным мероприятием по снижению потерь мощности и электроэнергии, а также по повышению коэффициента мощности ($\cos\phi$) является своевременное отключение и 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, торфоразработки, асфальтобетонные заводы и т. п.) и другими причинами.

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

Для определения целесообразности отключения одного из трансформаторов, работающих на общую нагрузку, необходимо использовать некоторый критерий оптимальности [1], [2]. Таким критерием может быть минимум потерь мощности за рассматриваемый период. Рассмотрим его подробнее.

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

Для трансформаторов, имеющих одинаковую номинальную мощность $S_{\text{ном}}$ и работающих параллельно на общую нагрузку, условием равенства потерь активной мощности при включении n и $(n-1)$ трансформаторов является выражение [3]

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

где ΔP_x и ΔP_k – потери холостого хода и короткого замыкания трансформатора.

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

Для трансформаторов, имеющих нагрузку, должны соблюдаться следующие ограничения:

$$\begin{aligned} S_i &\leq \beta_i S_{\text{ном}_i}; \\ \Theta_{T_i} &\leq \Theta_{T_{\text{доп}_i}}; \quad i = \overline{1, n}; \\ V_j &= \pm 0,05 U_{\text{ном}}; \quad j = \overline{1, k}, \end{aligned} \quad (2)$$

где S_i – полная мощность нагрузки i -го трансформатора; β_i – коэффициент допустимой загрузки i -го трансформатора; $S_{\text{ном}_i}$ – номинальная мощность i -го трансформатора; Θ_{T_i} – температура нагрева i -го трансформатора при нагрузке S_i ; $\Theta_{T_{\text{доп}_i}}$ – 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 $S > S_{\Delta P}$ 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.

При отдельной работе трансформаторов (рис. 1, б) и для однострансформаторных подстанций (рис. 1, в) выражение (1) имеет ограниченную пригодность, т. к. 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

$$S = S_1 + S_2, \quad (3)$$

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 целесообразно его отключить для уменьшения потерь мощности.

Потери активной мощности при работе одного трансформатора (Т1 или Т2) с нагрузкой S могут быть выражены как

$$\Delta P_1 = \Delta P_x + \Delta P_k \frac{(S_1 + S_2)^2}{S_{\text{НОМ}}^2}. \quad (4)$$

Выражение (4) представим в следующем виде:

$$\Delta P_1 = \Delta P_x + \Delta P_k \frac{S_1^2}{S_{\text{НОМ}}^2} + \Delta P_k \frac{S_2^2}{S_{\text{НОМ}}^2} + \Delta P_k \frac{2S_1S_2}{S_{\text{НОМ}}^2}. \quad (5)$$

В случае использования двух трансформаторов суммарные потери в них

$$\Delta P_2 = 2\Delta P_x + \Delta P_k \frac{S_1^2}{S_{\text{НОМ}}^2} + \Delta P_k \frac{S_2^2}{S_{\text{НОМ}}^2}. \quad (6)$$

Приравняв выражения (5) и (6), и выполнив соответствующие преобразования, получим:

$$2P_k S_1 S_2 = \Delta P_x S_{\text{НОМ}}^2. \quad (7)$$

Выразим нагрузку второго трансформатора в виде $S_2 = S - S_1$ и подставим ее в формулу (7):

$$2P_k S_1 (S - S_1) = \Delta P_x S_{\text{НОМ}}^2. \quad (8)$$

Из выражения (8) получим квадратное уравнение:

$$S_1^2 - SS_1 + \frac{\Delta P_x S_{\text{НОМ}}^2}{2\Delta P_k} = 0. \quad (9)$$

Уравнение второй степени имеет действительное решение при условии, что дискриминант

$$D = \frac{\Delta P_x S_{\text{НОМ}}^2}{2\Delta P_k} - \frac{S^2}{4} \leq 0. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что решение поставленной задачи имеет смысл при суммарной нагрузке:

$$S \geq S_{\text{НОМ}} \sqrt{\frac{2\Delta P_x}{\Delta P_k}}. \quad (11)$$

Правая часть выражения (11) 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 (9) относительно S_1 являются два действительных корня:

$$S_{1(1)} = \frac{S}{2} + \sqrt{\frac{S^2}{4} - \frac{\Delta P_x S_{\text{НОМ}}^2}{2\Delta P_k}}, \quad (12)$$

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

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.

Потери реактивной мощности в трансформаторах 6–10/0,4 кВ в зависимости от нагрузки в пять и более раз превышают потери активной мощности. При небольших активных нагрузках они способны оказывать определенное влияние на значение коэффициента мощности, особенно при отсутствии компенсирующих устройств в электрических сетях напряжением до 1 кВ. Поэтому в условиях дефицита реактивной мощности в узле системы электроснабжения может оказаться полезным знать нагрузки, при которых имеет смысл изменить число включенных трансформаторов для снижения потребления реактивной мощности.

При работе $(n-1)$ трансформаторов с общей нагрузкой S потери реактивной мощности в них

$$\Delta Q_T = \frac{(n-1)I_x S_{\text{НОМ}}}{100} + \frac{U_k S_{\Delta Q}^2}{(n-1)100 \cdot S_{\text{НОМ}}}, \quad (14)$$

а при работе n трансформаторов

$$\Delta Q_T = \frac{nI_x S_{\text{НОМ}}}{100} + \frac{U_k S_{\Delta Q}^2}{n \cdot 100 \cdot S_{\text{НОМ}}}. \quad (15)$$

Полная мощность нагрузки $S_{\Delta Q}$, при которой имеет место равенство потерь реактивной мощности в n и $(n-1)$ параллельно работающих трансформаторов, определяется в результате решения уравнения:

$$\frac{(n-1)I_x S_{\text{НОМ}}}{100} + \frac{U_k S_{\Delta Q}^2}{(n-1)100 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{nI_x S_{\text{НОМ}}}{100} + \frac{U_k S_{\Delta Q}^2}{n \cdot 100 \cdot S_{\text{НОМ}}}, \quad (16)$$

где I_x – ток холостого хода трансформатора, %; U_k – напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Из уравнения (16) получим:

$$S_{\Delta Q} = S_{\text{НОМ}} \sqrt{n(n-1) \frac{I_x}{U_k}}. \quad (17)$$

При $n = 2$

$$S_{\Delta Q} = S_{\text{ном}} \sqrt{\frac{2I_x}{U_k}}. \quad (18)$$

Таким образом, для уменьшения потерь реактивной мощности при нагрузке подстанции $S < S_{\Delta Q}$ целесообразно работать с одним, а при $S_{\Delta Q} > S_{\text{ном}}$ – с двумя трансформаторами.

У трансформаторов 6–10/0,4 кВ мощностью $S_{\text{ном}} = 250 – 2500$ кВ·А отношение $I_x/U_k = 0,07 – 0,63$. Следовательно, $S_{\Delta Q} = (0,37 – 0,12)S_{\text{ном}}$. Из формулы (18) следует, что у трансформаторов, у которых $I_x/U_k \geq 0,5$, равенство потерь реактивной мощности в одном и двух трансформаторах имеет место при нагрузке $S_{\Delta Q} \geq S_{\text{ном}}$. Это относится к трансформаторам мощностью $S_{\text{ном}} = 250$ кВ·А.

Как видим, диапазон изменения нагрузки $S_{\Delta Q} = (0,37 – 1,12)S_{\text{ном}}$ значительно шире диапазона изменения нагрузки $S_{\Delta P} = (0,53 – 0,73)S_{\text{ном}}$.

При раздельной работе трансформаторов (рис.1, б, в) нагрузка S_1 , которая может использоваться в качестве критерия при выборе числа работающих трансформаторов с целью уменьшения потерь реактивной мощности, определяется на основе решения следующего уравнения:

$$\frac{I_x S_{\text{ном}}}{100} + \frac{U_k (S_1 + S_2)^2}{100 S_{\text{ном}}} = \frac{2I_x S_{\text{ном}}}{100} + \frac{U_k S_1^2}{100 S_{\text{ном}}} + \frac{U_k S_2^2}{100 S_{\text{ном}}}. \quad (19)$$

После преобразования выражение (19) имеет вид:

$$\frac{2U_k S_1 S_2}{S_{\text{ном}}} = I_x S_{\text{ном}}. \quad (20)$$

Так как $S_2 = S - S_1$, то получаем уравнение:

$$S_1^2 - SS_1 + \frac{I_x S_{\text{ном}}^2}{2U_k} = 0. \quad (21)$$

Уравнение (21) имеет решение при $S \geq S_{\Delta Q}$.

Корнями уравнения (21) являются:

$$S_{1(1)} = \frac{S}{2} + \sqrt{\frac{S_2}{4} - \frac{I_x S_{\text{ном}}^2}{2U_k}}, \quad (22)$$

$$S_{1(2)} = \frac{S}{2} - \sqrt{\frac{S_2}{4} - \frac{I_x S_{\text{ном}}^2}{2U_k}}. \quad (23)$$

Потери реактивной мощности можно снизить, а значит повысить коэффициент мощности ($\cos \varphi$), если отключить трансформаторы Т2 при нагрузке $S_1 > S_{1(1)}$, и Т1 – при нагрузке $S_1 > S_{1(2)}$.

Отметим, что выбор рационального режима работы трансформаторов не должен производиться обособленно. Необходимо учитывать также режим работы системы

электроснабжения в целом, а также надежность электроснабжения потребителей и качество электроэнергии.

В соответствии с [4], эффективность любого энергосберегающего мероприятия должна оцениваться по одному или нескольким критериям оценки оптимальности. В частности, для оценки может быть использован такой показатель как чистый дисконтированный доход:

$$D = \sum_{t=0}^T (D_t - Z_t - I_t)(1 + E)^{-t}, \quad (24)$$

где D_t – денежные поступления (выручка, дивиденды и др.) от реализации мероприятия в t -м году; Z_t – эксплуатационные расходы по реализации мероприятия и другие платежи (налоги, пошлины и т. д.) в t -м году; I_t – инвестиции (капитальные вложения) в t -м году; T – период, в течение которого осуществляются инвестиции и эксплуатация оборудования, а также извлекается доход от реализации мероприятия; E – ставка дисконтирования. Ставка дисконтирования учитывает ставку рефинансирования Национального банка Республики Беларусь или фактическую ставку процента по долгосрочным кредитам банка, индекс цен (в необходимых случаях может использоваться надбавка за риск, которая добавляется к ставке дисконтирования для безрисковых вложений) и принимается для расчета в соответствии с настоящей Инструкцией, равной 10 % или $E = 0,1$.

Для рассматриваемого случая инвестиции и дополнительные эксплуатационные расходы не предполагаются и поэтому выражение (24) значительно упрощается:

$$D = \sum_{t=0}^T D_t. \quad (25)$$

Денежные поступления представляют собой стоимость сэкономленной электроэнергии и определяются по выражению [5]

$$D_t = m\Delta P_m + m_0\Delta P_x, \quad (26)$$

где m – стоимость 1 кВт максимальных активных нагрузочных потерь; m_0 – стоимость 1 кВт потерь холостого хода; ΔP_m – максимальные потери активной мощности; ΔP_x – потери холостого хода.

Величины m и m_0 определяются по формулам:

$$m = \left(\frac{a}{T_{\max}} + b \right) \tau = \beta \tau, \quad (27)$$

$$m_0 = \left(\frac{a}{T_{\max}} + b \right) T_b = \beta T_b, \quad (28)$$

где τ – годовое число максимальных потерь; T_b – годовое время включения трансформатора.

Положительное значение чистого дисконтированного дохода свидетельствует об экономической целесообразности реализации энергосберегающего мероприятия.

Выводы

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

2. Своевременное отключение трансформаторов при уменьшении нагрузок снижает потребление реактивной мощности и повышает коэффициент мощности.

Литература

1. Гончар А. А. О критериях оптимизации работы силового трансформатора / А. А. Гончар // Энергия и менеджмент. – 2004. – № 2. – С. 45.
2. Куценко Г. Ф. Выбор трансформаторов распределительных сетей 6–10 кВ по минимуму потерь электроэнергии / Г. Ф. Куценко, А. А. Парфенов. – Мн. : Энергоэффективность, 2001. – № 11. – С. 18–19.
3. Федоров Л. Л. Основы электроснабжения промышленных предприятий / Л. Л. Федоров, В. В. Каменева. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.
4. Инструкция по определению энергоэффективности использования средств, направляемых на выполнение энергосберегающих мероприятий // Национальный реестр правовых актов РБ. – 2004. – № 7, 8/10387.
5. Справочник по проектированию электроснабжения / под. ред. Ю. Г. Барыбина [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

Получено 29.07.2005 г.