

УДК 621.331

Кузнецов В.Г.*

КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

В данной статье показано, что для оптимального перевода силовых трансформаторов тяговых подстанций железных дорог на параллельную работу необходимо учитывать нестационарный характер тяговой нагрузки. Предложены критерии оптимального распределения мощности тяговых подстанций.

Капитальные затраты на систему электроснабжения железных дорог в большой степени определяются заданной надежностью электроснабжения потребителей. Стремление обеспечить бесперебойное питание потребителей, отнесенных не только к особой и 1 категории, приводит к 100 %-ному резервированию установленной мощности трансформаторов, сетей, коммутационной аппаратуры и т.д. Недогрузка трансформаторов в ряде случаев определяется схемой электроснабжения, требованиями высокой степени надежности питания потребителей электроэнергии.

Тяговые подстанции электрических железных дорог переменного тока являются, как правило, двухтрансформаторными. Питание тяговой нагрузки и районных потребителей обеспечивается одним трансформатором, установка второго диктуется соображениями обеспечения высокой надежности электроснабжения.

При загрузке силового трансформатора на 30 % нагрузочные потери примерно равны потерям холостого хода. В среднем на каждой трансформации теряется до 7 % передаваемой мощности [1]. Работа трансформатора в режиме холостого хода или близком к нему вызывает излишние потери электроэнергии не только в самом трансформаторе, но и по всей системе электроснабжения (от источника питания до самого трансформатора) из-за низкого коэффициента мощности.

Важным мероприятием по экономии потерь при эксплуатации тяговых подстанций железных дорог Украины является своевременное отключение в резерв силовых трансформаторов при снижении их нагрузки и включение при росте нагрузки [2].

Наличие избыточных трансформаторных мощностей выдвигает задачу рационального их использования. Дадим количественные оценки нагрузок трансформаторов, при которых переход на параллельную работу создает положительный эффект. Соответствующий подход для симметричных не случайных нагрузок известен давно. В качестве критериев перехода на параллельную работу используют в большинстве работ минимум активных потерь мощности.

Экономически целесообразный режим работы трансформаторов в [3] предложено определять в зависимости от суммарной нагрузки и числа параллельно включенных трансформаторов, обеспечивающих минимум приведенных потерь электроэнергии в этих трансформаторах

$$\Delta P_{\Sigma}' = n(\Delta P_x + \kappa_{\text{ин}} \Delta Q_x) + \frac{1}{n} (\Delta P_k + \kappa_{\text{ин}} \Delta Q_k) \kappa_3^2, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\Sigma}'$ - приведенные активные потери в параллельно работающих трансформаторах с учётом потерь, создаваемых ими во внешней системе электроснабжения; n - количество параллельно работающих трансформаторов; $\Delta P_x, \Delta Q_x$ - потери активной и реактивной мощности на холостом ходе; $\Delta P_k, \Delta Q_k$ - потери активной и реактивной мощности в режиме короткого замыкания; κ_3 - коэффициент загрузки трансформаторов; $\kappa_{\text{ин}}$ - коэффициент изменения потерь [1].

В отличие от нетяговых потребителей нагрузка тяговых подстанций железных дорог имеет нестационарный характер. Определим критическое значение математического ожидания тока нагрузки, при котором переход от k параллельно включенных трансформаторов к $k+1$ уменьшает активные потери в них.

* ДНУ железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна, канд. техн. наук., доц.

Запишем математическое ожидание активных потерь при включенных k и $k+1$ - м трансформаторе, а затем приравняем их:

$$kP_{XX} + \frac{1}{k}(M_{акр} + \sigma_a^2) = (k+1)P_{XX} + \frac{1}{k+1}(M_{акр} + \sigma_a^2), \quad (2)$$

где P_{XX} – потери холостого хода, а $M_{акр}$ и σ_a – математическое ожидание и дисперсия суммы активных потерь в первичной, районной и тяговой обмотках трансформатора.

Решение уравнения (2) относительно критического значения $M_{акр}$ имеет вид:

$$M_{акр} = k(k+1)P_{XX} - \sigma_a^2. \quad (3)$$

Для перехода от одного к двум параллельно работающим трансформаторам критическое значение определяется по формуле:

$$M_{акр} = 2P_{XX} - \sigma_a^2. \quad (4)$$

Если в качестве критерия выбрать минимум реактивных потерь, можно аналогично (2) составить уравнение:

$$k \frac{I_0 \cdot S_H}{100} + \frac{1}{k}(M_{ркр} + \sigma_p^2) = (k+1) \frac{I_0 \cdot S_H}{100} + \frac{1}{k+1}(M_{ркр} + \sigma_p^2), \quad (5)$$

где I_0 - ток холостого тока трансформатора; S_H - его номинальная мощность; $M_{ркр}$ и σ_p^2 - математическое ожидание и дисперсия суммы реактивных потерь в первичной, районной и тяговой обмотках трансформатора.

Решение этого уравнения имеет вид

$$M_{ркр} = k(k+1) \frac{I_0 S_H}{100} - \sigma_p^2, \quad (6)$$

что для перехода на параллельную работу двух трансформаторов дает

$$M_{ркр} = 2 \frac{I_0 S_H}{100} - \sigma_p^2. \quad (7)$$

Выбор числа параллельно работающих трансформаторов по критериям (4) и (7) дает возможность минимизировать средние активные или реактивные потери для практически важного случая ограниченного числа переключений коммутирующих аппаратов. В случае минимизации реактивных потерь средний эффект будет положительным независимо от распределения загрузки фаз, так как включение второго трансформатора приведет к уменьшению суммарной реактивной мощности, потребляемой трансформаторами из системы внешнего электроснабжения. Такое уменьшение ведет к снижению уровня обменной реактивной мощности между системой и тяговой подстанцией, что в свою очередь снижает потери напряжения в системе и в тяговых трансформаторах, увеличивая средний уровень напряжения на тяговых шинах и снижая разброс напряжения относительно среднего.

Рассмотрим эффективность выбора числа трансформаторов по критериям (4) или (7) при отсутствии районной нагрузки или ее пренебрежимой малости по сравнению с тяговой.

Активные потери в этом случае выражаются формулой:

$$\Delta P(t/k) = kP_{XX} + \frac{1}{3k} r_{TP} (m_L^2 + m_{II}^2 + m_P^2 + \sigma_L^2 + \sigma_{II}^2 + \sigma_P^2) = kP_{XX} + \frac{1}{3k} r_{TP} (M + \sigma^2), \quad (8)$$

где $r_{TP} = 3U_H^2 P_{K3} / S_H^2$ - активное сопротивление обмоток трансформатора; $m_L, m_{II}, m_P, \sigma_L^2, \sigma_{II}^2, \sigma_P^2$ - математические ожидания и дисперсии токов нагрузки плеч питания и цепи отсоса.

Аналогично для реактивных потерь можно записать

$$\Delta Q(t/k) = k \frac{I_0 S_H}{100} + \frac{1}{3k} x_{TP} (M + \sigma^2), \quad (9)$$

где $x_{TP} = 3u_K U_H^2 / (S_H \cdot 100)$ - индуктивное сопротивление фазы трансформатора; u_K - напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Формулы (4), (7) с учетом выражений (8) и (9) принимают вид:

$$M_{акр} = \frac{6P_{XX}}{r_{TP}} - \sigma^2, M_{ркр} = \frac{6I_0 S_H}{100 x_{TP}} - \sigma^2. \quad (10)$$

Зная числовые характеристики токов в плечах питания и цепи отсоса тяговой подстанции, можно определить значения суммы квадратов математических ожиданий M . При $M > M_{ркp}$ параллельная работа тяговых трансформаторов гарантирует снижение реактивных потерь и улучшение качества напряжения на тяговых шинах; при $M > M_{акp}$ обеспечивается снижение активных потерь при улучшении качества напряжения.

Оценим эффективность переключения тяговых трансформаторов для одной из подстанций железной дороги «Л». На подстанции установлено два тяговых трансформатора ТДТНЭ-40000/110, питаемой от энергосистемы.

Сопротивление одного трансформатора $x_{mp} = 5,96$ Ом. По формуле (10) имеем: $M_{акp} = 1333000 \text{ A}^2$; $M_{ркp} = 362700 \text{ A}^2$. На рис. 1 приведена кривая изменения $I^2(t)$.

В период от 1 ч 10 мин до 3 ч 00 мин рационально подключать второй трансформатор для снижения потерь реактивной мощности в тяговых трансформаторах.

Проведенный анализ на уровне главка [2] показывает, что рациональный перевод силовых трансформаторов на параллельную работу является мощным энергосберегающим методом для магистральных железных дорог.

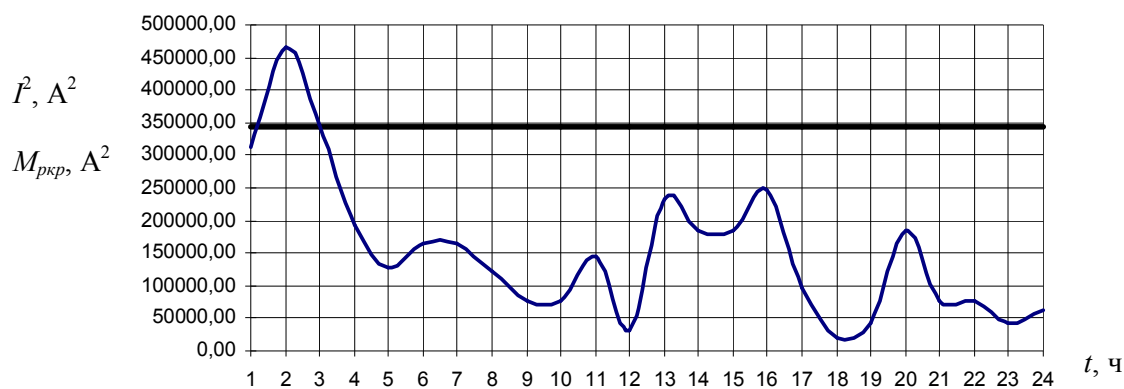


Рис. 1 – Рациональный переход на параллельную работу силовых трансформаторов тяговой подстанции «Д»

Выводы

1. Показано, что для оптимального распределения мощности тяговых подстанций железных дорог необходимо учитывать нестационарный характер тяговой нагрузки.

2. В качестве критериев для оптимального переключения тяговых подстанций на параллельную работу предложены: математическое ожидание активных потерь; математическое ожидание реактивных потерь.

3. Для подстанции «Д» Львовской железной дороги по данным профиля нагрузки получены рекомендации для оптимального переключения тяговой подстанции на параллельную работу силовых трансформаторов.

Перечень ссылок

1. Анчарова Т.В. Экономия электроэнергии на промышленных предприятиях / Т.В. Анчарова, С.М. Гамазин, В.В. Шевченко. – М.: Высшая школа, 1990.
2. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2005 році. – К.: Державна адміністрація залізничного транспорту, 2006. – 202 с.
3. Киреева Э.А. Автоматизация и экономия электроэнергии в системах промышленного электроснабжения / Э.А. Киреева, Т. Юнес, М. Айюби: Справочные материалы и примеры расчетов. – М.: Энергоатомиздат, 1998.

Рецензент: А.В. Остапчук,
канд. техн. наук, доц., НГУ

Статья поступила 11.04.2008