



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДВУХТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Д. П. Подъячев, магистрант,
ryan_cooper@bk.ru

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический
университет»

Описаны эффективные режимы работы двухтрансформаторной подстанции с целью уменьшения потерь мощности в трансформаторе. Рассмотрены особенности выбора мощности трансформаторов на подстанциях. Приведено определение значений граничных мощностей нагрузки. Обоснованы два аспекта перехода от одного режима работы подстанции к другому: ручной и автоматический.

подстанция, трансформатор, потери мощности, нагрузка, граничная мощность, электрическая сеть, параллельная работа

Выбирая число и мощность трансформаторов на подстанции, уделяют внимание величине и характеру нагрузок, надежности снабжения и характеру потребления электроэнергии, расположению нагрузок, их изменению, а также проводят технико-экономические расчеты [1].

На многих подстанциях нагрузка трансформаторов изменяется и долгое время может быть меньше, чем номинальная. Большую часть трансформаторов выбирают с учетом послеаварийного режима, и поэтому они являются недогруженными, несмотря на то, что рассчитаны на работу при температуре окружающей среды 40°C . На самом деле они работают в обычных условиях при температуре до 30°C . Также трансформатор можно перегрузить, учитывая рассмотренные события без всяких повреждений для установленного ему срока службы [2].

Определив место трансформатора в электрической сети, нужно знать, что чем дальше он от станции, тем меньше его мощность и тем больше потери на единицу мощности. Потери холостого хода постоянны. На них не влияет нагрузочный ток, и они появляются всегда, когда трансформатор включен в сеть. На нагрузочные потери влияет ток нагрузки, и они зависят от графика нагрузки.

Для снижения потерь холостого хода применяют холодно-катанную электротехническую сталь с улучшенными магнитными свойствами. С целью снижения нагрузочных потерь уменьшают плотность тока, для чего увеличивают массу металла в обмотках [3].

Допустимая перегрузка трансформатора в обычном режиме определяется старением изоляции его обмоток. Это ведет к изменениям свойств изоляции (механических, электрических). Примерный срок эксплуатации трансформатора около 20 лет.

Продолжительные допустимые нагрузки установлены в стандартах и технических условиях конкретного трансформатора. Иногда такой перегрузки для нормального использования изоляции не хватает. Тогда перегрузки ищут по графикам нагрузки в зависимости от времени суток, температуры охлаждения и постоянной времени трансформатора.

Если же на время перегрузки у персонала нет возможности использования графиков нагрузки, то пользуются таблицами, учитывая систему охлаждения [4].

Для достоверного выбора мощности трансформатора нужно иметь суточный график, на котором показана как максимальная, так и среднесуточная нагрузка подстанции и продолжительность максимума нагрузки [5]. При отсутствии графика нужно определить максимальную активную нагрузку подстанции P_{max} (МВт). Если исходить из выражения 1 при выборе мощности трансформатора на однострансформаторной подстанции

$$S_{ном} \geq \sum P_{max} \geq P_p, \quad (1)$$

где $\sum P_{max}$ – максимальная активная мощность на пятом году эксплуатации; P_p – проектная расчетная мощность подстанции, то при работе с кратковременными нагрузками трансформатор недогружается. Также возможно повышение номинальной мощности трансформатора и, отсюда, повышение установленной мощности подстанции. В некоторых случаях более выгодно выбрать номинальную мощность трансформатора, которая близка к максимальной продолжительной нагрузке.

Более экономичная работа трансформатора наблюдается в часы максимума, когда трансформатор перегружен. В реальности значение допустимого перегруза выбирается исходя из графика нагрузки, коэффициента начальной нагрузки и температуры окружающей среды.

Мощность каждого трансформатора на двухтрансформаторных подстанциях определяют с помощью аварийного режима работы, когда их мощность выбирают такую, чтобы при выходе из строя одного другой смог работать с аварийной перегрузкой и снабжать электроэнергией потребителей.

Номинальную мощность трансформатора $S_{ном}$ (МВ · А) на подстанции, на которой больше одного трансформатора, определяют из выражения 2:

$$S_{ном} \geq P_p / k_{пер} \cdot (n - 1) \cos\varphi, \quad (2)$$

где $P_p = P_{max} \cdot k_{I-II}$ – расчетная мощность, МВт; P_{max} – активная макс. мощность подстанции на пятом году эксплуатации, МВт; k_{I-II} – коэффициент участия в нагрузке потребителей I–II категорий; $k_{пер}$ – коэффициент допустимой аварийной перегрузки; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности.

Для подстанций, на которых в аварийном режиме около 25% потребителей может быть отключено, k_{I-II} принимают равным 0,75–0,85.

Так как $k_{I-II} < 1$, а $k_{пер} > 1$, то их отношение меньше единицы и представляет резервную мощность трансформатора. Чем меньше это отношение, тем меньше резерв установленной мощности трансформатора и больше эффективность использования мощности с учетом перегрузки.

Повышение коэффициента k ведет к повышению суммарной мощности трансформаторов на подстанции. Понизить коэффициент можно только до значения, при котором покрывается основная нагрузка рабочим трансформатором при отключении второго.

Следовательно, установленная мощность трансформатора определяют выражением 3:

$$S_{mp} \geq k \cdot P_{max} / \cos\varphi. \quad (3)$$

На первый взгляд, формула некорректна. На самом деле, единица измерения активной мощности – Вт, а полной – В·А. Так же они отличаются и в физическом смысле. Но нужно учитывать, что на шинах подстанций происходит компенсация реактивной мощности, и $\cos\varphi$ лежит в пределах 0,92–0,95. Эта ошибка, упрощающая формулу, не больше 10 %

инженерной ошибки, что объясняет и выражение (1), где активная и полная мощности не отличаются.

На подстанции можно установить несколько параллельных трансформаторов, и их мощности могут быть различными. Для анализа экономичного режима работы двухтрансформаторной подстанции, показанной на рис. 1, рассмотрим варианты с одинаковыми и различными мощностями трансформаторов.

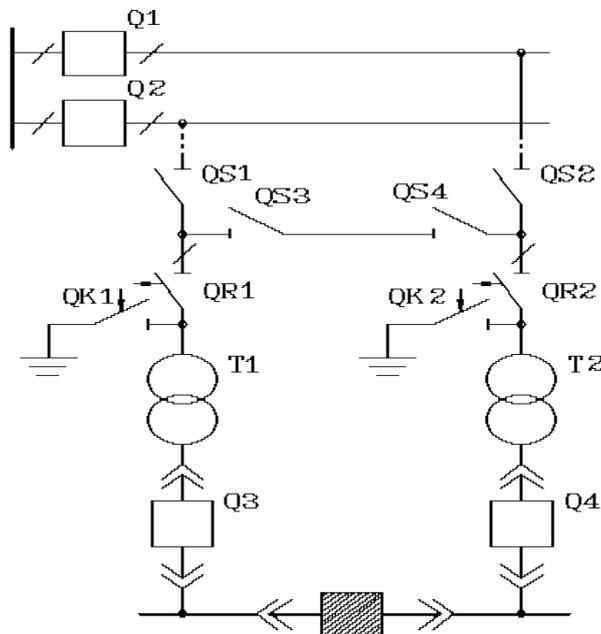


Рисунок 1 – Схема двухтрансформаторной подстанции

Рассмотрим случай с установкой на подстанции двух трансформаторов одинаковой мощности. На рис. 2 показаны зависимости потерь активной мощности одного ΔP_1 и двух ΔP_2 трансформаторов, работающих параллельно от нагрузки потребителей $S_{нагр}$. Мощность нагрузки $S_{гр}$ лежит на пересечении графиков. При этом потери мощности одного трансформатора соответствуют потерям мощности двух. Отсюда по этой точке и определяется значение мощности, более выгодной с точки зрения потерь мощности при переходе от работы одного трансформатора к работе двух, и наоборот.

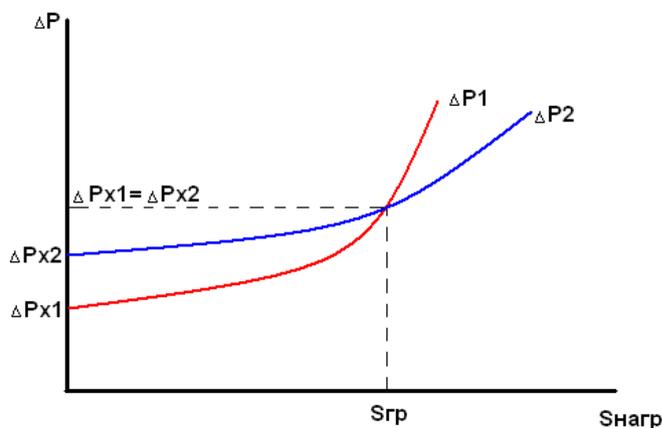


Рисунок 2 - Графики потерь активной мощности в трансформаторах одинаковой номинальной мощности

Потери мощности одного и двух параллельных трансформаторов определяют по выражениям (4) и (5):

$$\Delta P_1 = \Delta P'_x + \Delta P'_k(S/S_{\text{НОМ}})^2; \quad (4)$$

$$\Delta P_2 = 2(\Delta P'_x + \Delta P'_k(S/2S_{\text{НОМ}})^2), \quad (5)$$

где S – мощность нагрузки, МВ·А; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность трансформатора, М·А; $\Delta P'_x, \Delta P'_k$ – приведенные потери холостого хода и короткого замыкания, кВт.

Приведенные потери включают потери мощности и в трансформаторе, и в элементах системы электроснабжения, создаваемые самим трансформатором, которые зависят от потребляемой им реактивной мощности, и рассчитывают по выражениям (6) и (7):

$$\Delta P'_x = \Delta P_x + k_э \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot I_x\%/100; \quad (6)$$

$$\Delta P'_k = \Delta P_k + k_э \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot u_k\%/100, \quad (7)$$

где ΔP_x и ΔP_k – потери холостого хода и короткого замыкания соответственно, кВт; $I_x\%$ – ток холостого хода; $u_k\%$ – напряжение короткого замыкания; $k_э$ – коэффициент удельного прироста потерь активной мощности, зависящий от размещения источника реактивной мощности и покрывающий ее потребление. Для первого приближения примем $k_э$ равным 0,015кВт/кВ·А для трансформаторов на станциях, а для понижающих – 0,04 кВт/кВ·А [2].

Приравняв потери мощности одного и двух трансформаторов, находят граничную мощность по выражению (8):

$$\Delta P'_x + \Delta P'_k(S/S_{\text{НОМ}})^2 = 2(\Delta P'_x + \Delta P'_k(S/2S_{\text{НОМ}})^2); \quad (8)$$

$$S_{\text{ГР}} = S_{\text{НОМ}} \sqrt{2\Delta P'_x/\Delta P'_k}. \quad (9)$$

Поэтому более экономичную работу двухтрансформаторной подстанции с трансформаторами одной мощности определяют минимальными потерями в трансформаторах в течение всей нагрузки. Потери мощности показаны кривой $\Delta P_{x1} - S_{\text{ГР}} - \Delta P_2$ на рис. 2.

Теперь рассмотрим случай с установкой на подстанции двух трансформаторов разной мощности. Изначально полагаем, что мощность одного трансформатора Т1 меньше, чем мощность другого Т2. На рис. 3 изображены зависимости потерь менее мощного ΔP_1 , более мощного ΔP_2 и суммы потерь обоих трансформаторов ΔP_{Σ} от нагрузки потребителей $S_{\text{нагр}}$. Пересечению, в котором потери в Т1 равняются потерям в Т2, соответствует значение граничной мощности нагрузки в точке $S_{\text{ГР1}}$. Пересечению, в котором потери в Т2 равняются см потерям мощности в Т1 и Т2, соответствует значение граничной мощности нагрузки в точке $S_{\text{ГР2}}$. Отсюда граничная мощность $S_{\text{ГР1}}$ является наиболее выгодной с точки зрения потерь мощности при переходе от работы менее мощного трансформатора к более мощному, и наоборот. Граничная мощность $S_{\text{ГР2}}$ наиболее выгодна при переходе от работы более мощного трансформатора к двум параллельным трансформаторам, и наоборот.

Граничная мощности $S_{\text{ГР3}}$ не оценивается для определения экономичного режима работы двухтрансформаторной подстанции. Это значение лежит выше кривой, определяющей минимальные потери. Точка $S_{\text{ГР3}}$ определяет более выгодный переход от работы двух трансформаторов к работе менее мощного трансформатора.

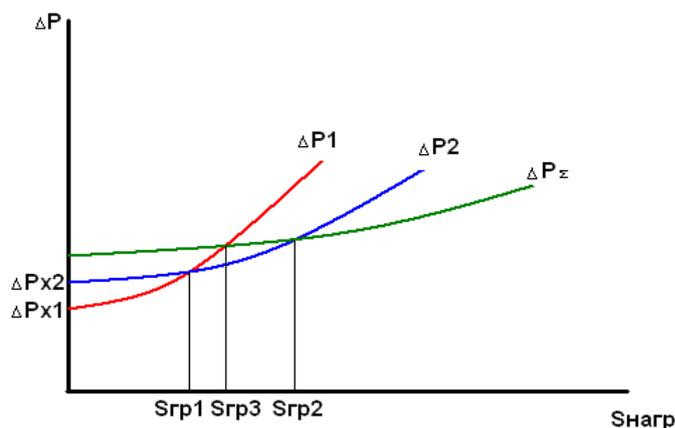


Рисунок 3 - Графики потерь активной мощности в трансформаторах разной номинальной мощности

Потери менее мощного трансформатора определяют по выражению (10):

$$\Delta P_1 = \Delta P'_{x1} + \Delta P'_{k1} (S/S_{\text{НОМ1}})^2 . \quad (10)$$

Потери более мощного трансформатора определяют по выражению (11):

$$\Delta P_2 = \Delta P'_{x2} + \Delta P'_{k2} (S/S_{\text{НОМ2}})^2 . \quad (11)$$

При параллельной работе минимальные потери соответствуют распределению нагрузки пропорционально установленной мощности трансформаторов, т. е. по выражению (12)

$$S_1/S_{\text{НОМ1}} = S_2/S_{\text{НОМ2}} , \quad (12)$$

где S_1 и S_2 – мощности нагрузки первого и второго трансформаторов.

Суммарные потери при двух работающих трансформаторах вычисляют по выражению (13):

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P'_{x1} + \Delta P'_{k1} (S_1/S_{\text{НОМ1}})^2 + \Delta P'_{x2} + \Delta P'_{k2} (S_2/S_{\text{НОМ2}})^2 . \quad (13)$$

Граничные мощности нагрузки находят по выражениям (14-16):

$$S_{\text{Гр1}} = \sqrt{S_{\text{НОМ1}}^2 \cdot S_{\text{НОМ2}}^2 (\Delta P'_{x2} - \Delta P'_{x1}) / S_{\text{НОМ2}}^2 \cdot \Delta P'_{k1} - S_{\text{НОМ1}}^2 \cdot \Delta P'_{k2}} , \quad (14)$$

$$S_{\text{Гр2}} = (1 + S_{\text{НОМ1}}/S_{\text{НОМ2}}) \sqrt{\Delta P'_{x1} \cdot S_{\text{НОМ2}}^4 / \Delta P'_{k2} (S_{\text{НОМ1}} + S_{\text{НОМ2}})^2 - (\Delta P'_{k1} + \Delta P'_{k2}) S_{\text{НОМ2}}^2} , \quad (15)$$

$$S_{\text{Гр3}} = (1 + S_{\text{НОМ1}}/S_{\text{НОМ2}}) \sqrt{\Delta P'_{x2} \cdot S_{\text{НОМ1}}^2 \cdot S_{\text{НОМ2}}^2 / \Delta P'_{k1} (S_{\text{НОМ1}} + S_{\text{НОМ2}})^2 - (\Delta P'_{k1} + \Delta P'_{k2}) S_{\text{НОМ1}}^2} . \quad (16)$$

Поэтому более экономичную работу двухтрансформаторной подстанции с трансформаторами разной номинальной мощности определяют минимальными потерями в течение всей нагрузки. Потери мощности показаны кривой $\Delta P_{x1} - S_{\text{Гр1}} - S_{\text{Гр2}} - \Delta P_{\Sigma}$ на рис. 3.

Для решения этой проблемы на подстанции ставят обычно два силовых трансформатора. В зависимости от общей нагрузки подстанции в ненагруженное время выгоднее отключить один из них. Этот режим считается эффективным, потому что КПД рабочего трансформатора становится выше [6].

С целью оптимального распределения нагрузок между двумя трансформаторами пропорционально их номинальной мощности применяется их параллельная работа при соблюдении некоторых условий: равны номинальные первичные и вторичные напряжения (разница коэффициентов трансформации не более $\pm 0,5\%$); одинаковые группы соединения обмоток; равны напряжения короткого замыкания (отклонение не больше 10 % от среднего). Если не соблюдаются первое и второе условия, то в обмотках появляются уравнивающие токи, и они могут достичь значений токов короткого замыкания. Если нарушается третье условие, то общая нагрузка распределяется непропорционально номинальным мощностям трансформаторов. Следует соблюдать условие, чтобы отношения номинальных мощностей параллельно работающих трансформаторов не превышали 3:1 [7].

С технической точки зрения переход от одного режима работы к другому бывает ручным и автоматическим. Ручные переходы применяют редко, в основном на двухтрансформаторных подстанциях, у которых нет потребителей первой категории, график нагрузки стабилен и мощность в любом режиме не превышает допустимую перегрузку. Почти на всех подстанциях такого типа работает один трансформатор, другой находится в резерве.

Если присутствуют потребители первой категории и вероятно увеличение мощности подстанции выше, чем перегрузочная способность одного трансформатора, то ручной вывод трансформатора в резерв не применяют. На таких подстанциях используют автоматический переход от работы одного трансформатора к работе двух, и наоборот. Автоматический переход означает наличие на подстанции аппаратуры для управления режимами работы в зависимости от графиков нагрузок [8].

Отметим, что оптимизация работы двухтрансформаторной подстанции сокращает потери электроэнергии в системах электроснабжения. Основным фактор, определяющий эффективность работы подстанции, – это совокупность графика электрических нагрузок потребителей и состава оборудования подстанции. Граничная мощность позволяет определять нагрузку потребителей, когда выгоднее перейти от одного режима работы к другому с точки зрения потерь мощности в трансформаторе. Потому важно разработать адаптивные системы распределения нагрузок между трансформаторами, чтобы уменьшить потери мощности и трансформаторов, и питающих систем электроснабжения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Выбор числа и мощности трансформаторов на подстанции [Электронный ресурс] // Выбор электрооборудования. [Офиц. сайт]. URL:<http://pue8.ru/vybor-elektrooborudovaniya/91-vybor-chisla-i-moschnosti-transformatorov-na-podstanciyah.html>
2. Трансформаторные подстанции в системах электроснабжения [Электронный ресурс] // Статьи по электроремонту и электромонтажу. [Офиц. сайт]. URL: <http://elektrica.info/transformatorny-e-podstantsii-v-sistemah-e-lektrosnabzheniya/>
3. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов / П.М. Тихомиров. - Москва: Энергоатомиздат, 1986. - 528 с.
4. Красник, В.В. Эксплуатация электрических подстанций и распределительных устройств: производственно-практическое пособие / В.В. Красник. – Москва: ЭНАС, 2011. – 320 с.: ил.
5. Быстрицкий, Г. Ф. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов / Г. Ф. Быстрицкий, Б. И. Кудрин. – Москва : Техн. лит., 2003. – 176 с.

6. Алюнов, А.Н. Оптимизация режимов работы силовых трансформаторов / А.Н. Алюнов, В.А. Бабарушкин, О.С. Вяткина // Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2014.–URL: <https://online-electric.ru/articles.php?id=114>

7. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: ЭНАС, 2012. – 376 с. : ил.

8. Гуминский, А. Н. Повышение эффективности режимов работы двухтрансформаторной подстанции / А.Н. Гуминский // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О.Сухого, 2011.

THE EFFICIENCY OF TWO-TRANSFORMER SUBSTATIONS

D. P. Podyachev, master student,
ryan_cooper@bk.ru
FGBOU VO "Kaliningrad state technical University»

The effective modes of operation of the two-transformer substation to reduce power losses in the transformer are described. The features of power selection of transformers at substations are considered. The definition of the values of the load boundary powers is given. Two aspects of transition from one mode of operation of substation to another are proved: manual and automatic.

substation, transformer, power loss, load, boundary power, electrical network, parallel operation