

## ОБ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ С РАСЩЕПЛЕННОЙ ОБМОТКОЙ<sup>1)</sup>

Г. В. ДЕЛЬ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций и подстанций  
и электрических сетей и систем)

Для ограничения величины токов короткого замыкания в распределительных сетях с трансформаторами мощностью 20 *Mva* в единице и выше в настоящее время чаще всего используют токоограничивающие реакторы. В подтверждение этого достаточно указать на капитальный труд Л. И. Двоскина [1], где рассмотрены основные и наиболее характерные компоновки распределительных устройств высокого напряжения. К сожалению, в этой книге не нашел никакого отражения безреакторный способ ограничения токов короткого замыкания с применением трансформаторов с расщепленной обмоткой.

При этом трансформаторы с расщепленной обмоткой могут быть использованы в следующих случаях [2]:

- 1) для питания двух линий передачи вместо двух менее мощных трансформаторов;
- 2) для распределения больших мощностей, при напряжениях 6—10 *кв*, что ограничивает мощность короткого замыкания на каждой из секций;
- 3) для секционирования шин генераторного напряжения на станциях;
- 4) для связи станции с системой, или в качестве трансформаторов связи между системами.

В настоящей работе сделана попытка найти критерии, определяющие экономическую целесообразность замены двухобмоточного трансформатора трансформатором с расщепленной обмоткой.

Рассмотрим указанную замену типов трансформаторов в ЗРУ 6—10 *кв* понизительных подстанций. Принципиальная схема соединений указанного распределительного устройства для двухобмоточного трансформатора приведена на рис. 1.

Предполагается, что в случае применения трансформаторов с расщепленной обмоткой принципиальная схема соединений преобразуется к виду, указанному на рис. 2.

При экономическом сравнении этих двух вариантов должны быть учтены следующие затраты [3]:

- 1) капитальные затраты на приобретение и монтаж трансформатора с амортизационными отчислениями;

<sup>1)</sup> Работа выполнена под руководством профессора доктора технических наук И. Д. Кутявина.

2) капитальные затраты на создание добавочной мощности системы, необходимой для покрытия потерь активной мощности в трансформаторе в период максимума нагрузки в системе;

3) стоимость потерь активной электроэнергии в трансформаторе за некоторый расчетный срок  $T$  лет.

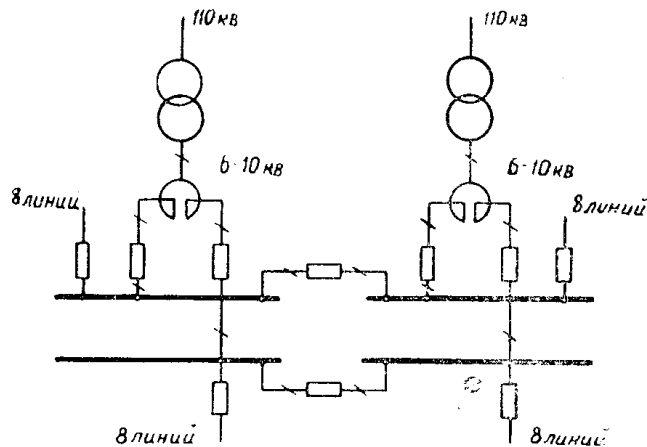


Рис. 1. Схема соединения РУ 6—10 кВ с одной системой шин, с установкой групповых двойных реакторов в цепях трансформаторов и с раздельной работой последних на стороне 6—10 кВ.

Амортизационные отчисления от капитальных затрат в относительных единицах примем равными  $a$ . Тогда амортизационные отчисления за расчетный срок  $T$  лет

$$Z_a = Z_p \cdot aT, \quad (1)$$

$Z_p$  — расчетная стоимость трансформатора. Полные затраты, связанные с установкой и эксплуатацией трансформатора, равны

$$Z_m = Z_p + Z_a = Z_p (1 + aT). \quad (2)$$

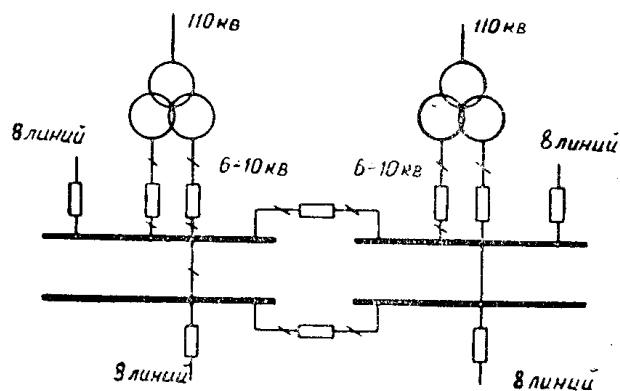


Рис. 2. Схема соединения РУ 6—10 кВ с одной системой шин, с применением трансформаторов с расщепленной обмоткой.

Установка трансформатора в системе связана с необходимостью создания в ней добавочной мощности для покрытия потерь в трансформаторе в период максимума нагрузки. Величина этой добавочной мощности согласно [3] выражается следующим образом:

$$P_d = p_c + p_m \left( \frac{k_c \cdot S_{M1}}{S} \right)^2, \quad (3)$$

где  $p_c$  и  $p_m$  — потери в стали и меди трансформатора при номинальных условиях;

$S_{мп}$  — максимум нагрузки годового графика для перспективного года, для которого выбирается мощность трансформатора;

$k_c$  — коэффициент попадания в максимум системы;

$S$  — номинальная мощность трансформатора.

Капитальные затраты на создание добавочной мощности в системе

$$Z_d = c_1 \cdot P_d, \quad (4)$$

где  $c_1$  — стоимость в рублях одного установленного киловатта добавочной мощности системы.

Создание добавочной мощности системы, предназначенной для покрытия потерь в трансформаторе, потребует увеличения капитальных вложений в строительство станций, топливной базы и транспорта топлива. Если учесть только первые две составляющие, то капитальные затраты на 1 *квт* добавочной мощности будут

$$c_1 = 1,1 (c_c + c_t \cdot q_t), \quad (5)$$

где 1,1 — коэффициент, учитывающий собственные расходы станции;

$c_c$  — средняя стоимость установленного киловатта в руб/*квт* по системам Советского Союза;

$q_t$  — средний годовой расход условного топлива на 1 *квт* добавочной мощности, в тоннах;

$c_t$  — средние капитальные затраты на создание топливной базы, отнесенные на 1 тонну годовой добычи, в руб./тонну.

Среднюю стоимость вновь устанавливаемого киловатта в системах Советского Союза в ближайшие годы намечено снизить до  $c_c = 100 \frac{\text{руб}}{\text{квт}}$ .

Годовой расход топлива на 1 *квт* добавочной мощности будет равен произведению удельного расхода условного топлива на 1 *квт/час* на годовую продолжительность использования этой мощности. Если принять средний удельный расход топлива 400 *гр/квт-час*, а продолжительность использования добавочной мощности  $T_m = 5000$  часов, то годовое потребление топлива добавочной мощностью составит

$$q_t = 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 5000 = 2,0 \text{ т.}$$

Средние капитальные затраты на создание топливной базы, отнесенные на тонну годовой добычи, можно принять  $c_t = 20$  руб/т. Тогда

$$c_1 = 1,1 (100 + 2,0 \cdot 20) = 154 \text{ руб/квт.} \quad (6)$$

Среднегодовые потери мощности в трансформаторе [3]

$$P_{cp} = p_c + p_m \cdot \frac{\tau}{t} \cdot \left( \frac{S_{мп}}{S} \right)^2, \quad (7)$$

где  $\tau$  — годовое время номинальных потерь;

$t$  — время работы трансформатора в году.

Тогда стоимость потерь электроэнергии в трансформаторе за расчетный срок  $T$  лет будет

$$Z_n = c_2 \left[ p_c T + p_m \cdot T_n \frac{\tau}{t} \left( \frac{S_{мп}}{S} \right)^2 \right], \quad (8)$$

где  $c_2$  — стоимость в рублях одного киловатт-года потерь.

$T_n$  — приведенное время потерь в меди в годах.

Для подстанционных трансформаторов  $T_n < T$  и может быть подсчитано по следующему выражению:

$$T_n = \left(\frac{S_{M1}}{S_{МП}}\right)^2 + \left(\frac{S_{M2}}{S_{МП}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{S_{MT}}{S_{МП}}\right)^2, \quad (9)$$

$S_{M1}, S_{M2}, \dots, S_{MT}$  — максимумы нагрузки первого, второго, ...,  $T$ -ого года. Суммарные затраты на трансформатор с учетом (2), (3), (4), (8) будут равны

$$Z_1 = Z_T + Z_D + Z_n = Z_p(1 + aT) + p_c(c_1 + c_2 \cdot T) + p_m \left(\frac{S_{МП}}{S}\right)^2 \left(c_1 k_c^2 + c_2 \cdot \frac{\tau}{t} \cdot T_n\right). \quad (10)$$

Затраты на реактор будут иметь, очевидно, те же составляющие, что и на трансформатор, т. е.:

1) капитальные затраты на приобретение и монтаж реактора с амортизационными отчислениями;

2) стоимость активных потерь электроэнергии в реакторе за расчетный срок;

3) капитальные затраты на создание добавочной мощности системы в период максимума нагрузки.

Аналогично (10) для реактора имеем

$$Z_2 = Z_{pp}(1 + aT) + p_{mp} \left(\frac{I_T}{2I_{pH}}\right)^2 \left(c_1 k_c^2 + c_2 \cdot \frac{\tau}{t} \cdot T_n\right). \quad (11)$$

Здесь  $Z_{pp}$  — расчетная стоимость реактора;

$p_{mp}$  — медные потери в реакторе (номинальные);

$I_T$  — ток во вторичной обмотке двухобмоточного трансформатора;

$I_{pH}$  — номинальный ток одной ветви реактора.

В (11) принято: а) режим работы реактора полностью совпадает с режимом работы трансформатора; б) потери в стали реактора равны нулю; в) процент амортизационных отчислений для трансформатора и реактора одинаков.

Итак, суммарные затраты на трансформатор и реактор для схемы РУ по рис. 1 выразятся согласно (9) и (10) следующим образом:

$$\sum Z = Z_1 + Z_2. \quad (12)$$

В предполагаемой схеме РУ (рис. 2) затраты на реактор отпадают и остаются затраты на трансформатор с расщепленной обмоткой.

Применение расщепленной обмотки, вероятно, вызовет некоторое удорожание трансформатора за счет большего числа выводов и несколько большей трудоемкости его изготовления по сравнению с трансформатором такой же мощности, но с нерасщепленной обмоткой. Точный процент удорожания, естественно, может быть выяснен только после детального расчета трансформатора с расщепленной обмоткой. Несомненно, что этот процент будет очень мал [4].

Что касается потерь холостого хода и короткого замыкания трансформатора с расщепленной обмоткой, то они, вероятно, будут равны потерям равноценного двухобмоточного трансформатора, при условии тех же электромагнитных нагрузок.

В общем случае затраты на трансформатор с расщепленной обмоткой выразятся

$$\sum Z' = Z'_1 = Z'_p(1 + aT) + p'_c(c_1 + c_2 T) + p'_m \left(\frac{S_{МП}}{S}\right)^2 \left(c_1 k_c^2 + c_2 \cdot \frac{\tau}{t} \cdot T_n\right). \quad (13)$$

Экономическая выгода от применения трансформатора с расщепленной обмоткой по схеме рис. 2, учитывая выражения (10), (12), (13), выразится

$$\begin{aligned} Z &= Z_1 + Z_2 - Z'_1 = \\ &= Z_2 - \left[ (1 + aT)(Z'_p - Z_p) + (p'_c - p_c)(c_1 + c_2 T) + \right. \\ &\quad \left. + (p'_m - p_m) \left( \frac{S_{мп}}{S} \right)^2 (c_1 k_c^2 + c_2 \cdot T_n) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Если стоимость и потери трансформатора с расщепленной обмоткой равны стоимости и потерям двухобмоточного трансформатора, то экономический эффект от замены трансформаторов выразится стоимостью суммарных затрат на реактор  $Z_2$ .

Если же разность  $(Z_1 - Z_2) > Z$ , то экономическая целесообразность применения трансформатора с расщепленной обмоткой исчезает.

Пример. Подсчитаем экономическую выгоду от применения трансформаторов с расщепленной обмоткой мощностью 31,5 Мва каждый, напряжением 110/3,6 кВ для РУ 6 кВ с одной системой шин.

Расчетная стоимость двухобмоточного трансформатора 31500 кВа без РПН с высшим напряжением 110 кВ, согласно таблицы П-17 [1] равна 37500 руб, в новых ценах.

Примем (согласно таблицы П-25 [1])  $a = 0,03$ . Согласно (6)  $c_1 = 154$  руб/квт. Из [3]  $c_2 = 70$  руб/квч-гг) (при средней себестоимости по Советскому Союзу около 0,8 коп/квтч  $k_c = 0,8$ ;  $\frac{S_{мп}}{S} = 0,8$ ;  $t = 8760$  часов;  $\tau = 4000$  часов;  $T_n = 5$  лет.

Согласно данным Запорожского трансформаторного завода потери указанного трансформатора равны:  $p_m = 201,2$  квт;  $p_c = 81,3$  квт. Номинальный ток вторичной обмотки трансформатора равен 2760 а.

Согласно [1], минимальный ток каждой ветви сдвоенного реактора должен быть не менее 0,675 номинального тока трансформатора, питающего две секции, т. е. должен быть равен 1860 а.

Для возможности ограничения мощности короткого замыкания в сети 6 кВ до 200 Мва, согласно предварительным расчетам и учитывая вышесказанное, можно взять реактор на 2000 а, 6 кВ, 8%.

Потери в каждой фазе реактора, при протекании в каждой половине фазы тока 2000 а, равны 9200 вт.

Заводская цена реактора — 1600 рублей за фазу (приложение II—I [1]).

Согласно [5], расчетная стоимость трансформатора составляет 1,8 отпускной стоимости. Принимая для реактора этот же коэффициент, найдем, что  $Z_{pp} = 9000$  рублей.

Примем, что трансформатор с расщепленной обмоткой дороже двухобмоточного в  $K_3$  раз, т. е.

$$Z'_p = K_3 \cdot Z_p. \quad (15)$$

Будем считать также, что потери первого трансформатора больше потерь второго в  $K_n$  раз, т. е.

$$\sum P' = K_n \cdot \sum P. \quad (16)$$

При этом для простоты примем, что

$$\begin{aligned} p'_c &= K_n \cdot p_c, \\ p'_m &= K_n \cdot p_m. \end{aligned} \quad (17)$$

Тогда суммарные затраты на реактор на основании (13) будут равны

$$Z_2 = 9000(1 + 0,06 \cdot 8) + 27,6 \left( \frac{2200}{4000} \right)^2 \cdot \left( 154 \cdot 0,8^2 + \right. \\ \left. + 70,5 \cdot \frac{400}{8760} \right) = 15460 \text{ рублей,}$$

$$I_T = \frac{0,8 \cdot 31500}{0,6} = 2200 \text{ а.}$$

Экономическая выгода от применения трансформатора с расщепленной обмоткой, согласно (14) с учетом (15), (16) и (17), будет равна (на один трансформатор)

$$Z = 15460 - \left[ 1,48 \cdot (K_3 - 1) \cdot 37500 + (K_n - 1) \cdot 81,3 \cdot (154 + 70 \cdot 8) + \right. \\ \left. (K_n - 1) \cdot 201,2 \cdot 0,8^2 \cdot \left( 154 \cdot 0,8^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + 70,5 \cdot \frac{4000}{8760} \right) \right] = 162260 - 55500 \cdot K_3 - 91300 \cdot K_n.$$

На рис. 3 приведены зависимости  $Z = f(K_3, K_n)$  на всю подстанцию. В случае равенства стоимостей и потерь двухобмоточного трансформатора и трансформатора с расщепленной обмоткой получаем экономический эффект порядка 31000 рублей.

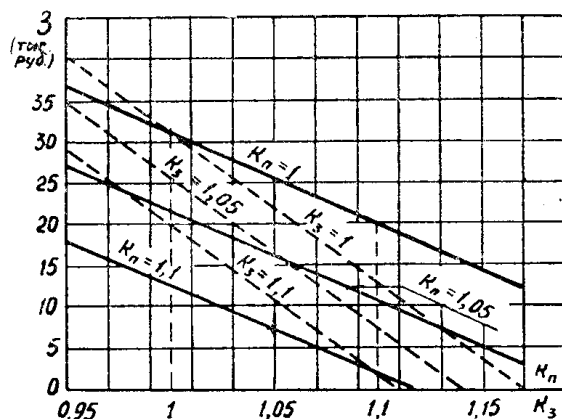


Рис. 3. Зависимость  $Z = f(k_3, k_n)$ .

Если же предположить стоимость трансформатора с расщепленной обмоткой больше стоимости двухобмоточного трансформатора на 10 % и потери первого больше потерь второго также на 10 %, то экономический эффект, даже в этом маловероятном случае, выразится 1500 рублями (в новых ценах).

### Выводы

1. Использование трансформаторов с расщепленной обмоткой на электрических подстанциях напряжением 6—10 кВ, мощностью 40 МВА и выше экономически целесообразно. Величина этой выгоды может быть оценена, примерно, в 10—20 тыс. рублей на каждую подстанцию за расчетный срок в 8 лет.

2. За счет исключения одного из промежуточных звеньев (реактора) эксплуатационная надежность схемы подстанции с трансформаторами с расщепленной обмоткой возрастает.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Двоскин. Компоновки и конструкции распределительных устройств высокого напряжения. Госэнергоиздат, 1960.
  2. D. D. Chase, A. N. Garin. Трансформаторы с расщепленной обмоткой. El. Eng., № 6; 1934 г., перевод — Энергетическое обозрение, № 1, 1935 г.
  3. И. Д. Кутявин. Об экономическом выборе мощности трансформаторов. Известия вузов. Энергетика, № 1, 1962.
  4. Л. Н. Баптиданов и В. Н. Тарасов. Электрооборудование электрических станций и подстанций. Госэнергоиздат, 1960.
  5. К. К. Балашов. К вопросу о технико-экономических основах проектирования трансформатора. ВЭП, № 1, 1960.
-