

УДК 621.3

Экономичность работы понизительных трансформаторных подстанций

И.В. Гороховик

Научный руководитель – проф. АНИЩЕНКО В. А.

1. Экономически целесообразный режим параллельной работы трансформаторов одинаковой мощности.

При проектировании и в условиях эксплуатации системы электроснабжения должен предусматриваться экономически целесообразный режим работы трансформаторов, сущность которого состоит в следующем. При наличии на подстанции нескольких трансформаторов, работающих на общие шины, число включенных трансформаторов определяется условием минимума потерь активной мощности в них при работе по заданному графику нагрузки. При этом учитываются потери активной мощности не только в самих трансформаторах, но и возникающие в системе электроснабжения по всей цепочке питания от генераторов электростанций до рассматриваемых трансформаторов из-за потребления ими реактивной мощности. Эти потери называют приведёнными и определяют по выражению:

$$\Delta P'_T = \Delta P'_X + K_3^2 \cdot \Delta P'_K, \tag{1}$$

где $\Delta P'_X = \Delta P_X + K_{и.п.} \cdot \Delta Q_X$ — приведённые потери холостого хода (XX) трансформатора, учитывающие потери активной мощности как в самом трансформаторе, так и создаваемые им в элементах всей системы электроснабжения в зависимости от реактивной мощности, потребляемой трансформатором;

$\Delta P'_K = \Delta P_K + K_{и.п.} \cdot \Delta Q_K$ — приведённые потери короткого замыкания (КЗ);

ΔP_X — потери мощности XX (в расчётах их приравнивают к потерям в стали трансформатора);

ΔP_K — потери мощности КЗ (в расчётах их приравнивают к потерям в меди обмоток трансформатора);

$K_{и.п.}$ — коэффициент изменения потерь;

$K_3 = S_{нг}/S_{ном.т}$ — коэффициент загрузки;

$S_{нг}$ — фактическая или расчётная нагрузка трансформатора;

$S_{ном.т}$ — номинальная мощность трансформатора;

$\Delta Q_X = S_{ном.т} \cdot I_x/100$ — реактивная мощность XX трансформатора;

$\Delta Q_K = S_{ном.т} \cdot u_k/100$ — реактивная мощность, потребляемая трансформатором при номинальной паспортной нагрузке;

I_x — ток XX трансформатора, %;

u_k — напряжение КЗ трансформатора.

Кривые приведенных потерь мощности трансформаторов в зависимости от изменения нагрузки $S_{нг}$ показаны на *рисунке 1*.

Выражение (1) можно представить в иной форме:

$$\Delta P'_T = \Delta P'_X + \frac{\Delta P'_K}{S_{ном.т}^2} \cdot S_{нг}^2, \tag{2}$$

Для упрощения дальнейшей записи обозначим:

$$\Delta P'_X = a \quad \text{и} \quad \Delta P'_K = b, \tag{3}$$

тогда $\Delta P'_T = a + b \cdot S_{нг}^2$.

Это уравнение параболы, и поэтому на *рис. 1* точки пересечения А, Б и В, соответствующие нагрузкам S_1, S_2, S_3 лежащие каждая одновременно на двух параболах (например, точка А) имеют координаты, удовлетворяющие совместному решению уравнений $\Delta P'_{T1} = a_1 + b_1 \cdot S_{нг}^2$ и $\Delta P'_{T2} = a_2 + b_2 \cdot S_{нг}^2$. В общем случае это может быть любая пара подобных кривых, причем каждая соответствует определенному количеству параллельно включенных трансформаторов.

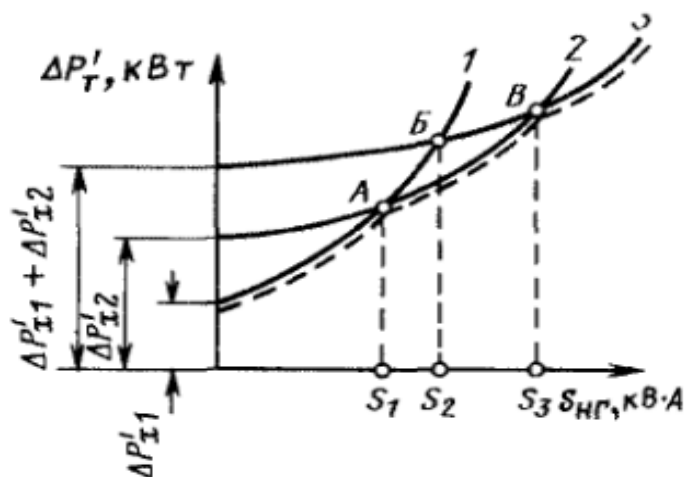


Рисунок 1 – Зависимость приведенных потерь активной мощности $\Delta P'_T$ в силовых трансформаторах от изменения нагрузки $S_{нг}$:
 1 и 2 - кривые потерь активной мощности в трансформаторах 1 и 2 при раздельной работе; 3 - кривая суммарных потерь активной мощности в трансформаторах 1 и 2 при параллельной работе; $\Delta P'_{x1}, \Delta P'_{x2}$ приведенные потери ХХ в трансформаторах 1 и 2

Для точки А справедливо равенство $\Delta P'_{T1.A} = \Delta P'_{T2.A}$, т.е. $a_1 + b_1 \cdot S_{нг.A}^2 = a_2 + b_2 \cdot S_{нг.A}^2$, откуда:

$$S_{нг.A} = \sqrt{\frac{a_1 - a_2}{b_2 - b_1}}, \tag{4}$$

или, что равносильно:

$$S_{нг.A} = \sqrt{\frac{a_2 - a_1}{b_1 - b_2}}, \tag{5}$$

Из (5) для трансформаторов одинаковой мощности получаем:

$$S_{нг.A} = S_{ном.т} \cdot \sqrt{n \cdot (n-1) \cdot \frac{\Delta P'_{x}}{\Delta P'_{к}}}, \tag{6}$$

Точку А и соответствующую ей нагрузку $S_{нг.A}$ определяют графическим и аналитическим способами. Аналитический способ является более удобным, так как обычно в расчетах интересуются только точками А, Б и В и соответствующими им нагрузками S_1, S_2, S_3 .

Выражением (6) пользуются для установления экономически целесообразного режим работы двух параллельно работающих трансформаторов, а также для решения вопроса об экономической целесообразности присоединения к группе трансформаторов дополнительно ещё одного трансформатора.

Для группы трансформаторов величины a и b в общем виде определяют

$$a_{\Sigma} = \sum_1^n \Delta P'_{x,i}; \quad b_{\Sigma} = \frac{\sum_1^n \Delta P'_{к,i}}{(\sum_1^n S_{ном.т,i})^2}, \tag{7}$$

где n – количество трансформаторов в группе; $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – порядковый номер трансформатора; Σ - индекс означающий, что величины в данном случае являются общими для все группы, состоящей из n трансформаторов [1, с.38].

2. Экономически целесообразный режим параллельной работы трансформаторов разной мощности.

В случае если на подстанции установлены трансформаторы разной мощности (допускается разница до трёх раз), их включение (отключение) согласно граничным значениям

нагрузки подстанции $S_{гр}$, определенным по (6), приведут к увеличению потерь активной мощности. Возникает необходимость разработки алгоритма выбора числа параллельно работающих трансформаторов разной мощности и очередности их включения при возрастании нагрузки подстанции.

Потери мощности в трансформаторе меньшей номинальной мощности:

$$\Delta P'_{т1} = \Delta P'_{x1} + \frac{\Delta P'_{к1}}{S_{ном.т1}^2} \cdot S_{нг1}^2, \quad (8)$$

Потери мощности в трансформаторе большей номинальной мощности:

$$\Delta P'_{т2} = \Delta P'_{x2} + \frac{\Delta P'_{к2}}{S_{ном.т2}^2} \cdot S_{нг2}^2, \quad (9)$$

При параллельной работе трансформаторов минимум потерь мощности соответствует распределению нагрузки пропорционально установленной мощности трансформаторов:

$$\frac{S_{нг1}}{S_{ном.т1}} = \frac{S_{нг2}}{S_{ном.т2}}, \quad (10)$$

где $S_{нг1}$ и $S_{нг2}$ - мощность нагрузки первого и второго трансформаторов соответственно. Суммарная мощность потерь при работе двух трансформаторов:

$$\Delta P'_{\Sigma} = \Delta P'_{x1} + \Delta P'_{x2} + \frac{\Delta P'_{к1}}{S_{ном.т1}^2} \cdot S_{нг}^2 + \frac{\Delta P'_{к2}}{S_{ном.т2}^2} \cdot S_{нг}^2, \quad (11)$$

Значения граничных мощностей нагрузки[2]:

$$S_{гр.1} = \sqrt{\frac{a_2 - a_1}{b_1 - b_2}} = \sqrt{\frac{\Delta P'_{x2} - \Delta P'_{x1}}{\Delta P'_{к1}/S_{ном.т1}^2 - \Delta P'_{к2}/S_{ном.т2}^2}} = \sqrt{\frac{S_{ном.т1}^2 \cdot S_{ном.т2}^2 \cdot (\Delta P'_{x2} - \Delta P'_{x1})}{S_{ном.т2}^2 \cdot \Delta P'_{к1} - S_{ном.т1}^2 \cdot \Delta P'_{к2}}}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} S_{гр.2} &= \sqrt{\frac{a_3 - a_2}{b_2 - b_3}} = \sqrt{\frac{(\Delta P'_{x1} + \Delta P'_{x2}) - \Delta P'_{x2}}{\Delta P'_{к2}/S_{ном.т2}^2 - (\Delta P'_{к1} + \Delta P'_{к2})/(S_{ном.т1} + S_{ном.т2})^2}} = \\ &= \sqrt{\frac{S_{ном.т2}^2 \cdot (S_{ном.т1} + S_{ном.т2})^2 \cdot ((\Delta P'_{x1} + \Delta P'_{x2}) - \Delta P'_{x2})}{(S_{ном.т1} + S_{ном.т2})^2 \cdot \Delta P'_{к2} - S_{ном.т2}^2 \cdot (\Delta P'_{к1} + \Delta P'_{к2})}} = \\ &= \sqrt{\frac{(S_{ном.т2}^2 \cdot S_{ном.т1}^2 + S_{ном.т2}^4 + 2 \cdot S_{ном.т2}^3 \cdot S_{ном.т1}) \cdot \Delta P'_{x1}}{(S_{ном.т1} + S_{ном.т2})^2 \cdot \Delta P'_{к2} - S_{ном.т2}^2 \cdot (\Delta P'_{к1} + \Delta P'_{к2})}} = \\ &= \sqrt{\frac{(S_{ном.т2}^2 \cdot S_{ном.т1}^2 + S_{ном.т2}^4 + 2 \cdot S_{ном.т2}^3 \cdot S_{ном.т1}) \cdot S_{ном.т2}^4 \cdot \Delta P'_{x1}}{(S_{ном.т1} + S_{ном.т2})^2 \cdot \Delta P'_{к2} - S_{ном.т2}^2 \cdot (\Delta P'_{к1} + \Delta P'_{к2})}} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{\frac{\left[\frac{S_{\text{НОМ.Т1}}^2}{S_{\text{НОМ.Т2}}^2} + 1 + 2 \cdot \frac{S_{\text{НОМ.Т1}}}{S_{\text{НОМ.Т2}}} \right] \cdot S_{\text{НОМ.Т2}}^4 \cdot \Delta P'_{x1}}{(S_{\text{НОМ.Т1}} + S_{\text{НОМ.Т2}})^2 \cdot \Delta P'_{k2} - S_{\text{НОМ.Т2}}^2 \cdot (\Delta P'_{k1} + \Delta P'_{k2})}} = \\
 &= \left(1 + \frac{S_{\text{НОМ.Т1}}}{S_{\text{НОМ.Т2}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{НОМ.Т2}}^4 \cdot \Delta P'_{x1}}{(S_{\text{НОМ.Т1}} + S_{\text{НОМ.Т2}})^2 \cdot \Delta P'_{k2} - S_{\text{НОМ.Т2}}^2 \cdot (\Delta P'_{k1} + \Delta P'_{k2})}}, \tag{13} \\
 S_{\text{ГР.3}} &= \sqrt{\frac{a_3 - a_1}{b_1 - b_3}} = \sqrt{\frac{(\Delta P'_{x1} + \Delta P'_{x2}) - \Delta P'_{x1}}{\Delta P'_{k1} / S_{\text{НОМ.Т1}}^2 - (\Delta P'_{k1} + \Delta P'_{k2}) / (S_{\text{НОМ.Т1}} + S_{\text{НОМ.Т2}})^2}} = \\
 &= \sqrt{\frac{S_{\text{НОМ.Т1}}^2 \cdot (S_{\text{НОМ.Т1}} + S_{\text{НОМ.Т2}})^2 \cdot ((\Delta P'_{x1} + \Delta P'_{x2}) - \Delta P'_{x1})}{(S_{\text{НОМ.Т1}} + S_{\text{НОМ.Т2}})^2 \cdot \Delta P'_{k1} - S_{\text{НОМ.Т1}}^2 \cdot (\Delta P'_{k1} + \Delta P'_{k2})}} = \\
 &= \sqrt{\frac{(S_{\text{НОМ.Т1}}^4 + S_{\text{НОМ.Т1}}^2 \cdot S_{\text{НОМ.Т2}}^2 + 2 \cdot S_{\text{НОМ.Т1}}^3 \cdot S_{\text{НОМ.Т2}}) \cdot \Delta P'_{x2}}{(S_{\text{НОМ.Т1}} + S_{\text{НОМ.Т2}})^2 \cdot \Delta P'_{k1} - S_{\text{НОМ.Т1}}^2 \cdot (\Delta P'_{k1} + \Delta P'_{k2})}} = \\
 &= \sqrt{\frac{(S_{\text{НОМ.Т1}}^4 + S_{\text{НОМ.Т1}}^2 \cdot S_{\text{НОМ.Т2}}^2 + 2 \cdot S_{\text{НОМ.Т1}}^3 \cdot S_{\text{НОМ.Т2}}) \cdot S_{\text{НОМ.Т1}}^4 \cdot \Delta P'_{x2}}{S_{\text{НОМ.Т1}}^4 \cdot (S_{\text{НОМ.Т1}} + S_{\text{НОМ.Т2}})^2 \cdot \Delta P'_{k1} - S_{\text{НОМ.Т1}}^2 \cdot (\Delta P'_{k1} + \Delta P'_{k2})}} = \\
 &= \sqrt{\frac{\left[1 + \frac{S_{\text{НОМ.Т2}}^2}{S_{\text{НОМ.Т1}}^2} + 2 \cdot \frac{S_{\text{НОМ.Т2}}}{S_{\text{НОМ.Т1}}} \right] \cdot S_{\text{НОМ.Т1}}^4 \cdot \Delta P'_{x2}}{(S_{\text{НОМ.Т1}} + S_{\text{НОМ.Т2}})^2 \cdot \Delta P'_{k1} - S_{\text{НОМ.Т1}}^2 \cdot (\Delta P'_{k1} + \Delta P'_{k2})}} = \\
 &= \left(1 + \frac{S_{\text{НОМ.Т1}}}{S_{\text{НОМ.Т2}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{НОМ.Т1}}^2 \cdot S_{\text{НОМ.Т2}}^2 \cdot \Delta P'_{x2}}{(S_{\text{НОМ.Т1}} + S_{\text{НОМ.Т2}})^2 \cdot \Delta P'_{k1} - S_{\text{НОМ.Т1}}^2 \cdot (\Delta P'_{k1} + \Delta P'_{k2})}}, \tag{14}
 \end{aligned}$$

Экономичный режим работы двухтрансформаторной подстанции с трансформаторами разной номинальной мощности определяется минимальными потерями в трансформаторах на всем диапазоне нагрузок. Потери мощности описывается кривой минимальных потерь $\Delta P_{\Sigma 12} \rightarrow S_{\text{НГ.1}} \rightarrow S_{\text{НГ.2}} \rightarrow \Delta P_{\Sigma 12}$ на графике (рисунок 3).

Таким образом, при минимальной нагрузке включается наименее мощный первый трансформатор. Граничная нагрузка подстанции, при достижении которой он отключается и включается второй, более мощный, определяется как:

$$S_{\text{ГР.1} \rightarrow 2} = \sqrt{\frac{S_{\text{НОМ.Т1}}^2 \cdot S_{\text{НОМ.Т2}}^2 \cdot (\Delta P'_{x2} - \Delta P'_{x1})}{S_{\text{НОМ.Т2}}^2 \cdot \Delta P'_{k1} - S_{\text{НОМ.Т1}}^2 \cdot \Delta P'_{k2}}}, \tag{15}$$

Граничная нагрузка подстанции (при дальнейшем её росте), при достижении которой вновь включается первый трансформатор, определяется по формуле:

$$S_{\text{ГР.2} \rightarrow [1+2]} = \left(1 + \frac{S_{\text{НОМ.Т1}}}{S_{\text{НОМ.Т2}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{НОМ.Т2}}^4 \cdot \Delta P'_{x1}}{(S_{\text{НОМ.Т1}} + S_{\text{НОМ.Т2}})^2 \cdot \Delta P'_{k2} - S_{\text{НОМ.Т2}}^2 \cdot (\Delta P'_{k1} + \Delta P'_{k2})}}, \tag{16}$$

Диаграмма состояний трансформаторов, показывающая очередность их включения и отключения при возрастающей нагрузке подстанции, приведена на *рисунке 2* [3].

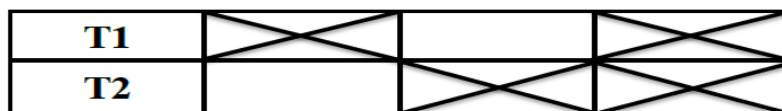



Рисунок 2 – Диаграмма состояний двухтрансформаторной подстанции;
 - включенные трансформаторы

На *рисунке 3* представлен пример, показывающий потери активной мощности подстанции с трансформаторами ТМН-6300/110 и ТДН-10000/110, с параметрами $S_{ном.Т1} = 6300$ кВт, $S_{ном.Т2} = 10000$ кВт, $\Delta P'_{x1} = 10$ кВт, $\Delta P'_{x2} = 14$ кВт, $\Delta P'_{к1} = 44$ кВт, $\Delta P'_{к2} = 58$ кВт в зависимости от разной нагрузки подстанции S_{Σ} .

Точка пересечения графиков $S_{гр1}$ соответствует значению граничной мощности нагрузки, при которой потери мощности в Т1 равны потерям мощности в Т2. Точка пересечения графиков $S_{гр2}$ соответствует значению граничной мощности нагрузки, при которой потери мощности в Т2 равны суммарной потерям мощности в Т1 и Т2. Следовательно значение ограниченной мощности $S_{гр1}$ определяет наиболее выгодный с точки зрения потерь мощности переход от режима работы трансформатором меньшей мощности к трансформатору большей мощности, и наоборот. Значение граничной мощности $S_{гр2}$ определяет точку наиболее выгодного перехода от режима работы трансформатором большей мощности к работе двумя параллельными трансформаторами, и наоборот.

Значение граничной мощности $S_{гр3}$ не имеет качественной оценки для определения экономических режимов работы двухтрансформаторной подстанции, значение мощности находится выше кривой минимальных потерь мощности. Мощность $S_{гр3}$ определяет точку наиболее выгодного перехода от режим работы двумя трансформаторами к работе одним трансформатором меньшей мощности, и наоборот.

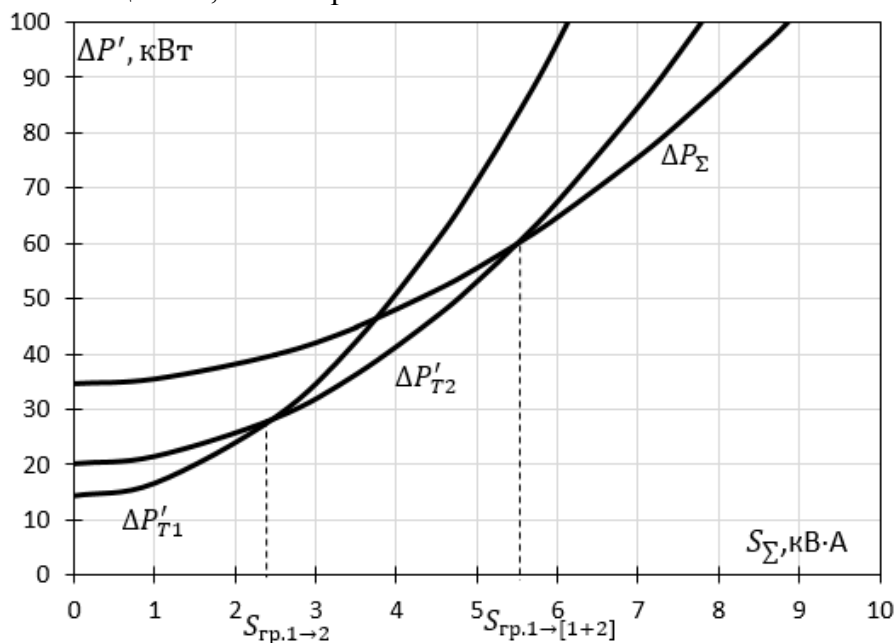


Рисунок 3 – График потерь активной мощности двухтрансформаторной подстанции с трансформаторами разной номинальной мощности

При параллельной работе трех трансформаторов минимум потерь мощности также соответствует распределению нагрузки пропорционально установленной мощности трансформаторов:

$$\frac{S_{нг1}}{S_{ном.т1}} = \frac{S_{нг2}}{S_{ном.т2}}, \tag{17}$$

В случае трёхтрансформаторной подстанции вначале включается также наименее мощный (первый) трансформатор. С увеличением нагрузки подстанции он отключается и включается трансформатор средней мощности (второй) при граничной нагрузке:

$$S_{гр.1 \rightarrow 2} = \sqrt{\frac{S_{ном.т1}^2 \cdot S_{ном.т2}^2 \cdot (\Delta P'_{x2} - \Delta P'_{x1})}{S_{ном.т2}^2 \cdot \Delta P'_{к1} - S_{ном.т1}^2 \cdot \Delta P'_{к2}}}, \tag{18}$$

Условие отключения второго и включения третьего, самого мощного, трансформатора:

$$S_{гр.2 \rightarrow 3} = \sqrt{\frac{S_{ном.т2}^2 \cdot S_{ном.т3}^2 \cdot (\Delta P'_{x3} - \Delta P'_{x2})}{S_{ном.т3}^2 \cdot \Delta P'_{к2} - S_{ном.т2}^2 \cdot \Delta P'_{к3}}}, \tag{19}$$

Условие второго включения второго трансформатора:

$$S_{гр.3 \rightarrow [2+3]} = \left(1 + \frac{S_{ном.т2}}{S_{ном.т3}}\right) \cdot \sqrt{\frac{S_{ном.т3}^4 \cdot \Delta P'_{x2}}{(S_{ном.т2} + S_{ном.т3})^2 \cdot \Delta P'_{к3} - S_{ном.т3}^2 \cdot (\Delta P'_{к2} + \Delta P'_{к3})}}, \tag{20}$$

Условие второго включения первого трансформатора:

$$S_{гр.[2+3] \rightarrow [1+2+3]} = \sqrt{\frac{(\Delta P'_{x1} + \Delta P'_{x2} + \Delta P'_{x3}) - (\Delta P'_{x2} + \Delta P'_{x3})}{(\Delta P'_{к2} + \Delta P'_{к3}) / (S_{ном.т2} + S_{ном.т3})^2 - (\Delta P'_{к1} + \Delta P'_{к2} + \Delta P'_{к3}) / (S_{ном.т1} + S_{ном.т2} + S_{ном.т3})^2}}, \tag{21}$$

Диаграмма состояний трансформаторов трёхтрансформаторной подстанции представлена на *рисунке 4*. Параметры трансформаторов приведены в *таблице*. График потерь активной мощности этой подстанции в зависимости от её нагрузки приведён на *рисунке 5*.

Таблица 1. Параметры трансформаторов

Параметр	ТМН-6300/110	ТДН-10000/110	ТДН-16000/110
S _{ном} , кВт	6 300	10 000	16 000
ΔP _x , кВт	10	14	18
ΔP _к , кВт	44	58	85

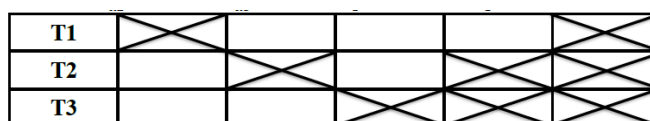


Рисунок 4 –Состояния трёхтрансформаторной подстанции

Экономичный режим работы трехтрансформаторной подстанции с трансформаторами разной номинальной мощности определяется минимальными потерями в трансформаторах на всем диапазоне нагрузок. Потери мощности описывается кривой минимальных потерь $\Delta P_{T1} \rightarrow S_{нг.1} \rightarrow S_{нг.2} \rightarrow S_{нг.3} \rightarrow S_{нг.23} \rightarrow \Delta P_{\Sigma 123}$ на графике (*рисунке 5*).

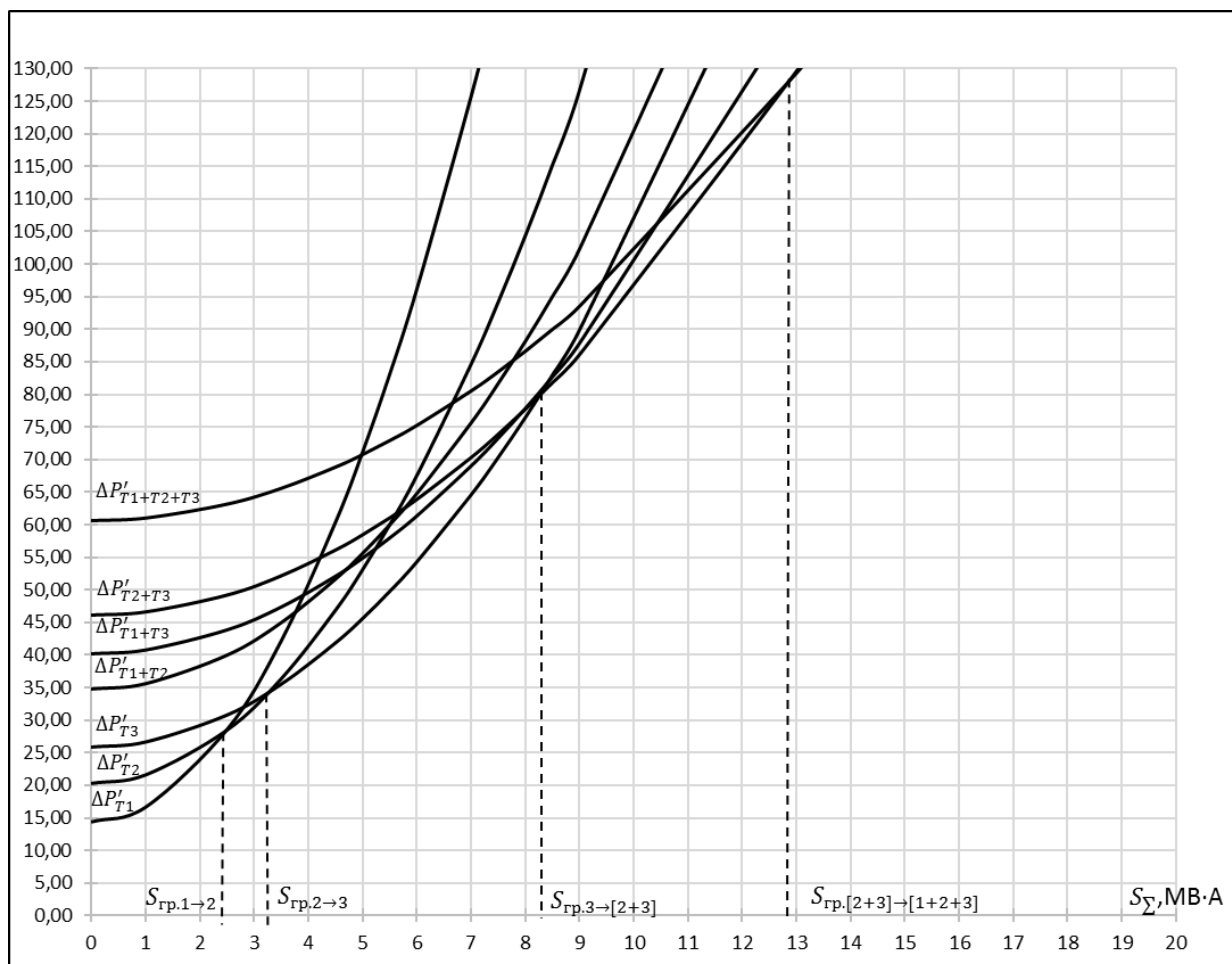


Рисунок 5 – График потерь активной мощности трёхтрансформаторной подстанции с трансформаторами разной номинальной мощности

3. Потери мощности трансформаторов при несимметричных нагрузках

Установившиеся несимметричные режимы работы электроэнергетических систем приводят к возрастанию токов в отдельных фазах и перегреву элементов систем. Это может вызвать неправильные действия релейной защиты, привести к повышенному влиянию на провода связи, ухудшению качества электроэнергии в следствии появления несимметрии междофазных напряжений.

В промышленных электрических сетях часто имеет место несимметричные нагрузки трансформаторов. Если мощность трансформатора при работе в таком режиме выбрана по наиболее загруженной фазе, то будет явное недоиспользование его номинальной мощности. Поэтому трансформатор целесообразно выбирать с учетом его возможной перегрузки, что дает возможность уменьшить требуемую мощность.

Допустимая нагрузка на трансформатор в несимметричных режимах работы определяется нагревом отдельных его частей. Проведенные исследования показали [1], что ток в наиболее загруженной фазе допускается выше номинального. Коэффициент перегрузки, допустимой в несимметричном режиме определяется по формуле:

$$K_{\Pi} = \frac{I_A}{I_{н.т.}} = \frac{1,525}{\sqrt{1 + 0,45 \cdot \left[1 + \left(\frac{I_B}{I_A} \right)^2 + \left(\frac{I_C}{I_A} \right)^2 \right]}}, \quad (22)$$

где I_A — ток наиболее загруженной фазы;

$I_{н.т.}$ — номинальный ток фазы трансформатора;

I_B, I_C — токи в двух других фазах, нагруженных меньше фазы А.

Влияние нагрузки фаз В и С на величину допустимой нагрузки фазы А показывают кривые на *рисунке 6*, полученные в результате расчетов по формуле (22).

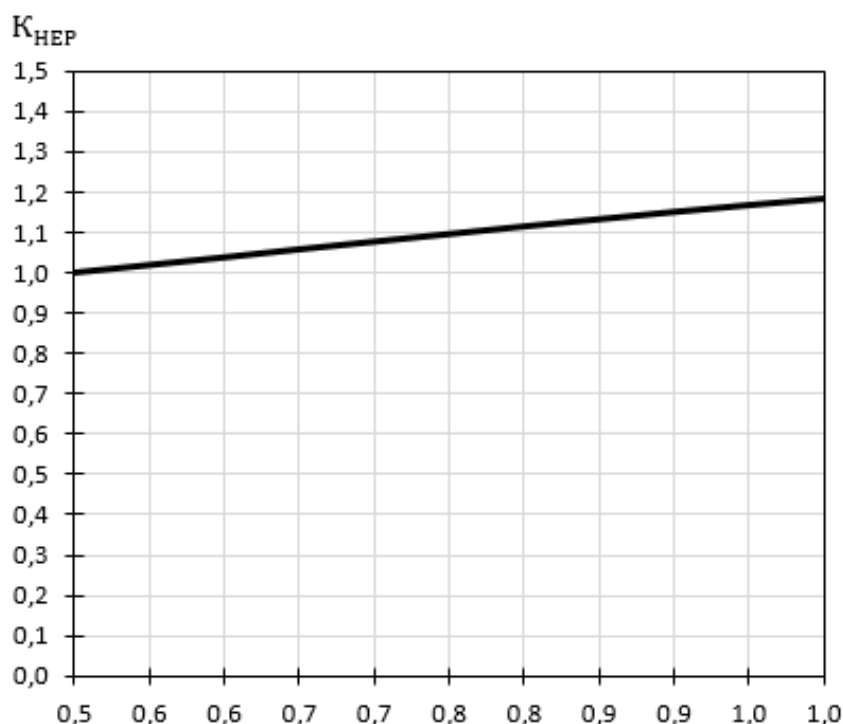


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента перегрузки от недогрузки фаз В и С

Работа трансформатора при несимметричной нагрузке приводит к дополнительным потерям мощности и энергии в стали и обмотках. Согласно данным исследований, обобщенных в монографии, при максимальной несимметрии токов в трехфазной четырехпроводной сети 0,4 кВ, возникающей при однофазной нагрузке, потери мощности и энергии в сети с трансформаторами Y / Y_N достигают 30% от мощности и энергии, передаваемой в сети. При трехфазной симметричной нагрузке коэффициенты обратной и нулевой последовательности равны нулю, а потери мощности и энергии от токов прямой последовательности максимальные и составляют примерно 14%. Таким образом, существенное снижение потерь мощности и энергии в сетях 0,4 кВ можно получить за счет уменьшения несимметрии токов в этих сетях[4].

При отсутствии симметрирующих устройств для уменьшения потерь мощности и энергии на подстанциях следует выбирать число параллельно включенных в работу трансформаторов в соответствии со стандартной формулой (6) для трансформаторов одинаковой мощности, а для трансформаторов разной мощности использовать полученные формулы (17-20). При этом величины потерь холостого хода и короткого замыкания должны учитывать дополнительные потери в системе и обмотках трансформаторов из-за несимметричной нагрузки.

Выводы

1. Произведен вывод формул, позволяющий выбирать число включенных на параллельную работу трансформаторов разной мощности на двухтрансформаторных и трехтрансформаторных понизительных подстанциях для уменьшения потерь мощности и электрической энергии.

2. Получена количественная оценка зависимости коэффициента перегрузки одной фазы трансформатора в режиме несимметричной нагрузки от недогрузки двух других фаз.

Литература

1. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: /Под общ. ред. А.А. Федорова. Т.2. Электрооборудование – Москва: Энергоатомиздат, 1987. - 592 с., С.37–38.
2. Гороховик И. В. Экономичность параллельной работы трансформаторов / И. В. Гороховик; научн. рук. В. А. Анищенко // Актуальные проблемы энергетики: материалы 72-й научно-технической конференции студентов и аспирантов / Белорусский национальный технический университет, Энергетический факультет. – Минск: БНТУ, 2016. – С.284-287.
3. Гороховик И. В., Анищенко, В.А. Экономически целесообразный режим работы многотрансформаторной подстанции//Энергия и менеджмент. 2016. Т. 15, вып. 6. С. 13–15.
4. Энергосбережение в низковольтных электрических сетях при несимметричной нагрузке. Под общей ред. Ф.Д. Косохова. СПб, Изд-во «Лань», 2016. – 280с.