

УДК 658.26

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С РАЗНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Сикорский Н.Ю.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Радкевич В.Н.

Применение параллельной работы цеховых трансформаторов напряжением 10(6)/0,4 кВ позволяет:

- уменьшить на 25 - 30 % суммарную установленную мощность трансформаторов (по сравнению с отдельной их работой), увеличить коэффициент загрузки трансформаторов и снизить требуемую резервную мощность на случай выхода трансформаторов из строя;

- повысить качество электроэнергии из-за стабильного уровня токов короткого замыкания (КЗ) во всей сети, что дает возможность подключать электроприемники с нелинейными нагрузками большой мощности (электросварка, вентильная нагрузка), а в ряде случаев, позволяет осуществлять совместное питание нелинейных нагрузок с электроприемниками, требующими высокого качества напряжения (электроосвещение, ЭВМ, станки с ЧПУ и др.);

- повысить надежность срабатывания защитных аппаратов при однофазных КЗ в электрической сети;

- обеспечить возможность поэтапного ввода трансформаторных мощностей по мере роста фактических нагрузок предприятия (цеха);

- снизить потери электроэнергии в трансформаторах за счет возможного отключения части ненагруженных трансформаторов при одно- и двухсменных режимах работы предприятия и др.

При включении силовых трансформаторов на параллельную работу, должны соблюдаться следующие условия:

1. Группы соединения обмоток одинаковые;
2. Коэффициенты трансформации отличаются не более чем на $\pm 0,5\%$;
3. Напряжения КЗ трансформаторов (U_k) отличаются не более чем на $\pm 10\%$;
4. Соотношение номинальных мощностей трансформаторов не более 1:3;
5. Произведена фазировка трансформаторов.

Рассмотрим параллельную работу трех трансформаторов с разными напряжениями КЗ U_k (рисунок 1).

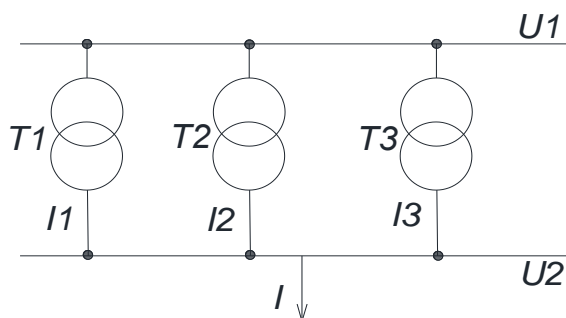


Рисунок 1. Схема включения трансформаторов на параллельную работу

Считаем, что трансформаторы имеют одинаковые группы соединений обмоток и равные коэффициенты трансформации. Пренебрегаем токами намагничивания (холостого хода) ввиду их незначительности по сравнению с током нагрузки. Упрощенную схему параллельной работы трех трансформаторов можно представить в виде, изображенном на рисунке.2.

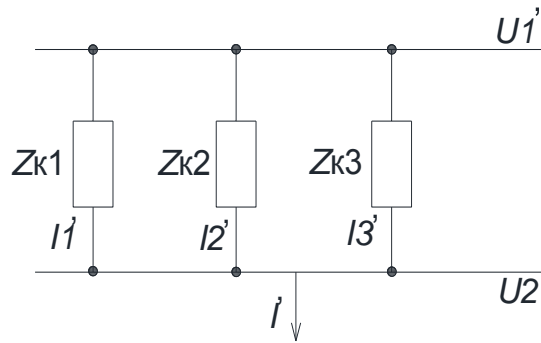


Рисунок 2. Схема замещения электроустановки

Из схемы замещения следует, что падения напряжения у всех трех трансформаторов одинаковы и равны:

$$\Delta \dot{U} = Z \cdot \dot{I}. \tag{1}$$

где I - общий ток нагрузки;

Z – суммарное полное сопротивление схемы замещения, определяемое по выражению

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_{k1}} + \frac{1}{Z_{k2}} + \frac{1}{Z_{k3}}} = \frac{1}{\sum_n \frac{1}{Z_{kn}}}. \tag{2}$$

где Z_{k1} , Z_{k2} и Z_{k3} – полное сопротивление соответствующего трансформатора.

Тогда токи отдельных трансформаторов вычисляются по следующей формуле:

$$\dot{I}_i = \frac{\Delta \dot{U}}{Z_{ki}} = \frac{Z \cdot \dot{I}}{Z_{ki}} = \frac{\dot{I}}{Z_{ki} \cdot \sum_n \frac{1}{Z_{kn}}}. \tag{3}$$

В общем случае эти токи не совпадают по фазе, так как аргументы φ_{k1} , φ_{k2} , φ_{k3} комплексов сопротивлений КЗ могут быть не равны и тогда сопротивления выражаются по формулам

$$Z_{k1} = z_{k1} \cdot e^{j\varphi_{k1}}; \quad Z_{k2} = z_{k2} \cdot e^{j\varphi_{k2}}; \quad Z_{k3} = z_{k3} \cdot e^{j\varphi_{k3}}. \tag{4}$$

Однако в обычных условиях эти сдвиги по фазе незначительны и с достаточной для практических расчетов точностью можно принять, что

$$I = I_1 + I_2 + I_3. \tag{5}$$

В связи с этим, и арифметическая сумма полных мощностей трансформаторов может быть принята полной мощности нагрузки потребителя электроэнергии S :

$$S = S_1 + S_2 + S_3. \tag{6}$$

Вследствие изложенного, комплексные величины в выражениях (2) и (3) можно заменить их модулями:

$$z_{ki} = \frac{u_{ki}\%}{100} \cdot \frac{U_{н}}{I_{н}}. \tag{7}$$

Аналогичные выражения получим и для z_{k2} и z_{k3} . Подставим выражения (4) для z_k в (3) и заменим токи на пропорциональные им полные мощности, умножив (3) на величину mU_n . Тогда можно записать следующее выражение:

$$m \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_i = \frac{m \cdot U_{\text{ном}} \cdot I}{\frac{u_{ki}\%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}i}} \cdot \sum_n \frac{100 \cdot I_{\text{ном}j}}{u_{kj}\% \cdot U_{\text{ном}}}}; \quad (8)$$

$$S_i = \frac{S_p}{\frac{u_{ki}\%}{S_{\text{ном}i}} \cdot \sum_n \frac{S_{\text{ном}j}}{u_{kj}\%}}, \quad (9)$$

где S_p – общая нагрузка трансформаторов, кВ·А;

S_i – полная мощность, которая будет передаваться через рассматриваемый i -й трансформатор в сеть вторичного напряжения, кВ·А;

$S_{\text{ном}i}$ – номинальная мощность рассматриваемого i -го трансформатора;

$S_{\text{ном}j}$ – мощность j -го трансформатора, работающего параллельно, кВ·А;

$u_{ki}\%$ – напряжение короткого замыкания рассматриваемого i -го трансформатора, %;

$u_{kj}\%$ – напряжение короткого замыкания j -го трансформатора, %;

n – количество параллельно работающих трансформаторов.

Согласно [3], напряжения КЗ параллельно включенных трансформаторов могут отличаться не более чем на ± 10 %. В данном нормативном документе не указано, по отношению к какому значению U_k определяется это отклонение. Поэтому принимаем, что допускается различие в напряжениях КЗ по отношению к среднему значению $U_{\text{кс}}$ [1], определяемому по выражению

$$U_{\text{кс}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n U_{ki}. \quad (10)$$

Отклонение фактического напряжения КЗ j -го трансформатора от $U_{\text{кс}}$, выраженное в процентах, рассчитывается по формуле

$$\delta U_{\text{кс}} = \frac{U_{kj} - U_{\text{кс}}}{U_{\text{кс}}} \cdot 100\%. \quad (11)$$

Распределительные трансформаторы номинальной мощностью 630-2500 кВ·А напряжением (6-10)/0,4кВ, применяемые в системах электроснабжения промышленных предприятий, имеют значения $U_k = 4,5; 5,5$ и 6% .

Рассмотрим, возможна ли параллельная работа двух распределительных трансформаторов, имеющих $U_{k1} = 5,5\%$ и $U_{k2} = 6\%$. Выполним расчеты по формулам (10) и (11):

$$U_{\text{кс}} = \frac{1}{2} \cdot (5,5 + 6) = 5,75\%;$$

$$\delta U_{k1} = \frac{5,5 - 5,75}{5,75} \cdot 100\% = -4,35\%; \quad \delta U_{k2} = \frac{6 - 5,75}{5,75} \cdot 100\% = +4,35\%$$

Так как $\delta U_{k1}, \delta U_{k2}$ не выходят за пределы ± 10 %, то параллельная работа рассмотренных силовых трансформаторов допустима. Аналогично можно произвести расчеты для других возможных сочетаний U_k для двухтрансформаторных и трехтрансформаторных подстанций. Результаты расчета представлены в таблице 1.

С учетом максимального значения одного трансформатора $U_k = 6\%$ предельно допустимая величина $\delta U_{kj} = \pm 10$ % имеет место при $U_k = 4,9\%$ второго трансформатора.

Определим мощности, передаваемые через трансформаторы в сеть напряжением до 1000В в зависимости от значений U_k и номинальных мощностей.

Таблица 1. Допустимость значений U_k параллельно работающих силовых трансформаторов.

Номер группы	Номер трансформатора.	Напряжение КЗ, %	Среднее значение U_k , %	Значение δU_k , %	Допустимость сочетания U_k
	1	4,5		-10,00	
1	2	5,5	5	+10,00	да
	1	5,5		-4,35	
2	-	-	5,75	-	да
	2	6		+4,55	
	1	4,5		-14,29	
3	2	6	5,25	+14,29	нет
	1	4,5		-6,90	
4	2	4,5	4,83	-6,90	нет
	3	5,5		+13,79	
	1	4,5		-12,90	
5	2	5,5	5,17	+6,45	нет
	3	5,5		+6,45	
	1	4,5		-10,00	
6	2	4,5	5,00	-10,00	нет
	3	6		+20,00	
	1	4,5		-18,18	
7	2	6	5,50	+9,09	нет
	3	6		+9,09	
	1	5,5		-2,94	
8	2	5,5	5,67	-2,94	да
	3	6		+5,88	
	1	5,5		-5,71	
9	2	6	5,83	+2,86	да
	3	6		+2,86	
	1	4,5		-15,63	
10	2	5,5	5,33	+3,13	нет
	3	6		+12,50	

При разных U_k и $S_{ном} = 1000$ кВ·А выполним расчет по формуле (9) для разной общей мощности нагрузки ($S_p \leq \sum S_{номi}$). Для примера произведем расчет для первой группы трансформаторов (таблица 1):

$$S_1 = \frac{1000}{\frac{4,5}{1000} \cdot \left(\frac{1000}{5,5} + \frac{1000}{4,5} \right)} = 550 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$S_2 = \frac{1000}{\frac{5,5}{1000} \cdot \left(\frac{1000}{5,5} + \frac{1000}{4,5} \right)} = 450 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Аналогично проведем расчеты для остальных значений S_p и других допустимых сочетаний U_k . Результаты расчетов приведены в таблицах 3 - 6.

Таблица 3. Распределение мощности между трансформаторами для группы 1.

$S_p, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном1} = 1000 \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном2} = 1000 \text{кВ}\cdot\text{А}$
1000	550,00	450,00
1500	825,00	675,00
2000	1100,00	900,00
2400	1320,00	1080,00

Таблица 4. Распределение мощности между трансформаторами для группы 2.

$S_p, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном1} = 1000 \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном2} = 1000 \text{кВ}\cdot\text{А}$
1000	521,74	478,26
1500	782,61	717,39
2000	1043,48	956,52
2400	1252,17	1147,83

Таблица 5. Распределение мощности между трансформаторами для группы 8.

$S_p, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном1} = 1000 \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном2} = 1000 \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном3} = 1000 \text{кВ}\cdot\text{А}$
1000	342,86	342,86	314,29
1500	514,29	514,29	471,43
2000	685,71	685,71	628,57
2500	857,14	857,14	785,71
3000	1028,57	1028,57	942,86
3600	1234,29	1234,29	1131,43

Таблица 6. Распределение мощности между трансформаторами для группы 9.

$S_p, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном1} = 1000 \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном2} = 1000 \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном3} = 1000 \text{кВ}\cdot\text{А}$
1000	352,94	323,53	323,53
1500	529,41	485,29	485,29
2000	705,88	647,06	647,06
2500	882,35	808,82	808,82
3000	1058,82	970,59	970,59
3600	1270,59	1164,71	1164,71

Выполним аналогичные расчеты для трансформаторов с разными U_k и номинальными мощностями (таблица 7). Результаты расчета приведены в таблицах 8 - 11.

Таблица 7. Технические характеристики трансформаторов ТМГ12

Тип трансформатора	$S_{ном}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	Напряжение к.з., $U_k \%$
ТМГ12-400/10-У1(ХЛ1)	400	4,5
ТМГ12-630/10-У1(ХЛ1)	630	5,5
ТМГ12-1000/10-У1(ХЛ1)	1000	5,5
ТМГ12-1250/10-У1(ХЛ1)	1250	6,0

Таблица 8. Распределение мощности между трансформаторами для группы 1.

$S_p, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном1} = 400 \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном2} = 1000 \text{кВ}\cdot\text{А}$
1000	328,36	450,00
1500	492,54	675,00
2000	656,72	900,00
2400	788,06	1080,00

Таблица 9. Распределение мощности между трансформаторами для группы 2.

$S_p, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном1}=630 \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном2}=1250 \text{кВ}\cdot\text{А}$
1000	354,76	645,24
1500	532,14	967,86
2000	709,53	1290,47
2400	851,43	1548,57

Таблица 10. Распределение мощности между трансформаторами для группы 8.

$S_p, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном1}=630 \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном2}=1000 \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном3}=1250 \text{кВ}\cdot\text{А}$
1000	226,96	360,25	412,79
1500	340,44	540,38	619,18
2000	453,92	720,50	825,58
2500	567,40	900,63	1031,97
3000	680,88	1080,76	1238,37
3600	817,05	1296,91	1486,04

Таблица 11. Распределение мощности между трансформаторами для группы 9.

$S_p, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном1}=630 \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном2}=1250 \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{ном3}=1250 \text{кВ}\cdot\text{А}$
1000	215,63	392,18	392,18
1500	323,45	588,28	588,28
2000	431,26	784,37	784,37
2500	539,08	980,46	980,46
3000	646,89	1176,55	1176,55
3600	776,27	1411,87	1411,87

Выводы

1. Расчеты показали, что при одинаковых значениях U_k , условия параллельной работы являются наилучшими. Если же U_k не равны, то при повышении нагрузки, номинальной мощности прежде всего достигнет трансформатор с наименьшим U_k . Другие трансформаторы при этом будут недогружены. Однако при этом дальнейшее увеличение общей нагрузки недопустимо, так как первый трансформатор будет перегружаться. Это справедливо в тех случаях, в которых номинальная мощность трансформаторов одинаковая.

2. Незначительная разница U_k , например, на 0,5%, параллельно работающих трансформаторов с одинаковыми номинальными мощностями, ведет к увеличению разницы мощностей, передаваемой через трансформаторы, приблизительно в 2,3 раза. Таким образом, установленная мощность трансформаторов будет недоиспользованной.

3. При параллельной работе трансформаторов с разными номинальными мощностями соотношение их номинальных мощностей не может превышать 1:3. Это вызвано тем, что даже при небольших перегрузках, трансформаторы меньшей мощности будут больше загружаться в процентном отношении и, особенно в том случае, если они имеют меньшие U_k .

Литература

1. Токарев, Б.Ф. Электрические машины / Б.Ф. Токарев. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 672 с.
 2. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 360 с.
- ТКП 181-2009(02230). Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. - Минск: Минэнерго, 2009. - 326с.