

УДК 621.311.017

РАЦИОНАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗАГРУЗКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМУМА КПД

Супрунук А.В., Мильто А.В.

Научный руководитель - к.т.н., доцент РАДКЕВИЧ В.Н.

В процессе проектирования и эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий необходимо обеспечивать экономичность и надежность функционирования силовых трансформаторов напряжением (6-10)/0,4 кВ. В статической постановке задачи, т.е. без учета фактора времени, одним из простых критериев оценки эффективности работы трансформатора может служить максимум коэффициента полезного действия (КПД) трансформатора. Максимум имеет место, когда потери холостого хода (XX) равны потерям в обмотках трансформатора. Из условия равенства потерь XX и нагрузочных потерь можно найти коэффициент загрузки трансформатора, соответствующий максимуму КПД [1]:

$$\beta_{TP} = \sqrt{\frac{\Delta P_x}{\Delta P_\kappa}}, \quad (1)$$

где ΔP_x и ΔP_κ - соответственно потери XX и короткого замыкания трансформатора, кВт.

Так как нагрузки, минимизирующие потери активной и реактивной мощности, не всегда совпадают, то при оценке рационального режима работы трансформаторов в некоторых случаях пользуются так называемыми приведенными потерями холостого хода $\Delta P'_x$ и короткого замыкания $\Delta P'_\kappa$ трансформатора. Они учитывают не только потери активной мощности непосредственно в трансформаторах, но и дополнительные потери активной мощности, возникающие во всей цепи от генераторов источника питания до рассматриваемых трансформаторов из-за потребления ими реактивной мощности. Приведенные потери активной мощности определяются по следующей формуле [2]:

$$\Delta P'_T = \Delta P'_x + \Delta P'_\kappa \cdot \beta_T^2, \quad (2)$$

где $\Delta P'_x$ - приведенные потери холостого хода, кВт;

$\Delta P'_\kappa$ - приведенные потери короткого замыкания, кВт;

β_T - коэффициент загрузки трансформатора.

Приведенные потери холостого хода вычисляются по выражению

$$\Delta P'_x = \Delta P_x + \kappa_{ин} \cdot \frac{I_x \cdot S_{ном}}{100}, \quad (3)$$

где $\kappa_{ин}$ - коэффициент изменения потерь (экономический эквивалент реактивной мощности), кВт/квар;

I_x - ток холостого хода трансформатора, %;

$S_{ном}$ - номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

Значение приведенных потерь КЗ рассчитывается по формуле

$$\Delta P'_\kappa = \Delta P_\kappa + \kappa_{ин} \cdot \frac{U_\kappa \cdot S_{ном}}{100}, \quad (4)$$

где U_k – напряжение КЗ трансформатора, %.

Коэффициент изменения потерь показывает, сколько киловатт активной мощности теряется в элементах электроэнергетической системы при передаче одного киловольт-ампера реактивного от генераторов электростанции до трансформаторов, установленных на предприятии. Для промышленных предприятий его значение принимается равным 0,07-0,1 кВт/квар [2].

Коэффициент загрузки силового трансформатора, соответствующий минимуму приведенных потерь мощности, отнесенных к единице передаваемой мощности, определяется по выражению [2]

$$\beta'_{TP} = \sqrt{\frac{\Delta P'_x}{\Delta P'_k}} \quad (5)$$

В СЭС промышленных предприятий могут применяться разные типы силовых трехфазных трансформаторов напряжением (6-10)/0,4 кВ с жидким диэлектриком. Как правило, используются номинальные мощности $S_{ном} = 630; 1000$ и 1600 кВ·А. Их общая характеристика дана в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика силовых трехфазных трансформаторов напряжением (6-10)/0,4 кВ

Тип	Номинальная мощность, кВ·А	Особенности конструктивного исполнения
ТНЭЗ	630; 1000; 1600	Защищенный герметичный трансформатор с обмотками из меди, у которого в качестве изолирующего и охлаждающего диэлектрика применяется негорючая и экологически чистая жидкость <i>Midel 7131</i> .
ТНЭЗ А	630; 1000; 1600	То же, но с обмотками, выполненными из алюминия.
ТМГ	630; 1000;	Герметичный маслonaполненный трансформатор с обмотками из алюминия.
ТМГ11	630; 1000; 1600	То же, но с меньшими потерями холостого хода.
ТМГ12	630; 1000	То же, но с меньшими потерями КЗ по сравнению с ТМГ11
ТМГ15	630; 1000	То же, но меньшими потерями холостого хода по сравнению с ТМГ12
ТМГ21	630; 1000	Герметичный маслonaполненный трансформатор с обмотками из алюминия. Вторичная обмотка выполнена из алюминиевой фольги с бумажной изоляцией.
ТМЗ	630; 1000; 1600	Маслonaполненный защищенный трансформатор. В баке под небольшим избыточным давлением имеется азотная подушка.
ТМ	630; 1000; 1600	Маслonaполненный трансформатор с открытыми изоляторами и расширителем для масла.

Приняв $k_{ин}=0,1$ кВт/квар, произведем расчет β_{TP} и β'_{TP} для основных типоразмеров силовых трехфазных трансформаторов разных серий. Полученные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициенты загрузки трансформаторов напряжением (6-10)/0,4 кВ, соответствующие максимуму КПД

Коэффициент загрузки	$S_{ном},$ кВ·А	Тип силового трансформатора								
		ТНЭЗ	ТНЭЗ А	ТМГ	ТМ 11	ТМГ12	ТМГ15	ТМГ21	ТМЗ	ТМ
$\beta_{ТР}$	630	0,53	0,44	0,37	0,38	0,34	0,33	-	0,40	0,41
	1000	0,47	0,38	0,39	0,36	0,32	0,30	0,33	0,39	0,43
	1600	0,50	0,41	-	0,36	-	-	0,35	0,40	0,45
$\beta'_{ТР}$	630	0,52	0,43	0,36	0,37	0,34	0,32	-	0,39	0,40
	1000	0,45	0,38	0,38	0,35	0,32	0,29	0,33	0,39	0,42
	1600	0,48	0,40	-	0,35	-	-	0,34	0,39	0,44
$\beta_{Тв}$	630	0,92	0,76	0,64	0,65	0,59	0,57	-	0,68	0,70
	1000	0,80	0,66	0,67	0,62	0,56	0,51	0,58	0,68	0,73
	1600	0,86	0,71	-	0,62	-	-	0,60	0,69	0,77

Значение $\beta_{ТР}$ зависит от технических характеристик трансформатора, которые устанавливаются в процессе его создания. Силовые трансформаторы проектируются таким образом, чтобы максимум КПД имел место при коэффициенте загрузки $\beta_{ТР}=0,5-0,7$ [1], т.е. соответствовал бы их наиболее вероятной нагрузке в нормальном режиме работы в условиях эксплуатации.

Данные, приведенные в таблице 2, показывают, что значения $\beta_{ТР}$ находится в диапазоне 0,3-0,53, а $\beta'_{ТР}$ - 0,29 - 0,52. Это несколько меньше величин коэффициента загрузки, указанных в [1]. Расчеты $\beta'_{ТР}$ по приведенным потерям ХХ и КЗ трансформаторов дают результаты, несущественно отличающиеся от значений $\beta_{ТР}$.

Потери активной мощности в системах электроснабжения являются важным режимным показателем. Однако этот показатель не в полной мере характеризует эффективность передачи электроэнергии в электрической сети [3]. Трансформаторы, как правило, имеют неравномерный график нагрузки. Поэтому при оценке эффективности использования трансформатора, вместо КПД по мощности, более правомерно применять КПД по электрической энергии, который рассчитывается по формуле

$$\eta_w = \frac{W_2}{W_1}, \quad (6)$$

где W_1 и W_2 – соответственно количество электроэнергии, полученной из питающей электрической сети, и отданной в сеть вторичного напряжения в течение рассматриваемого периода (как правило, года).

Значение электроэнергии, полученной трансформатором за год из питающей электрической сети, можно определить по следующему соотношению:

$$W_1 = W_2 + \Delta P_x \cdot T_g + \Delta P_k \cdot \beta_T^2 \cdot \tau, \quad (7)$$

где T_g - число часов включения трансформатора в течение года, ч;

β_T -коэффициент загрузки трансформатора, найденный по максимальной полной мощности;

τ - время максимальных потерь, ч.

С учетом (7) выражение (6) запишем как

$$\eta_w = \frac{W_2}{W_2 + \Delta P_x \cdot T_g + \Delta P_k \cdot \beta_T^2 \cdot \tau} \quad (8)$$

В соответствии с [1,3] из условия $\frac{\partial \eta_w}{\partial \beta_w} = 0$ получаем

$$\beta_{Tw} = \sqrt{\frac{\Delta P_x \cdot T_g}{\Delta P_k \cdot \tau}} \quad (9)$$

Так как $T_g > \tau$, то β_{Tw} в $\sqrt{T_g/\tau}$ раз больше β_{TP} . Следовательно, значение коэффициента загрузки трансформатора, соответствующее максимуму годового КПД по электроэнергии, определяется как

$$\beta_{Tw} = \beta_{TP} \sqrt{\frac{T_g}{\tau}} \quad (10)$$

Значение τ , характеризующее график нагрузки трансформатора, зависит от времени использования максимума нагрузки T_{max} . При оценке использования и технического уровня трансформаторного оборудования промышленных предприятий, имеющего высшее номинальное напряжение 10 кВ, рекомендуется принимать $T_g = 8600$ ч, $T_{max} = 5000$ ч, $\tau = 2900$ ч [4]. В этом случае можно записать

$$\beta_{Tw} = 1,72 \beta_{TP} \quad (11)$$

По выражению (11) выполним расчеты коэффициента загрузки для силовых трансформаторов (таблица 1). Результаты расчета показаны в таблице 2.

Используя данные, приведенные в таблице 2, находим, что для основных типоразмеров силовых трансформаторов напряжением (6-10)/0,4 кВ $\beta_{Tw} = 0,51 - 0,92$.

Работа силовых распределительных трансформаторов с коэффициентом загрузки β_{Tw} снижает потери электроэнергии в СЭС и обеспечивает надежное электроснабжение потребителей электроэнергии.

Выводы

1. Более высокие коэффициенты загрузки, соответствующие максимуму КПД, как по активной мощности, так и по электроэнергии, имеют силовые трансформаторы типа ТНЭЗ и ТНЭЗ А, в которых в качестве изолирующего и охлаждающего диэлектрика применяется негорючая и экологически чистая жидкость *Midel 7131*. При этом номинальная мощность трансформаторов типа ТНЭЗ с обмотками, выполненными из меди, используется в более высокой степени.

2. Трансформаторы типа ТМГ15 по сравнению с другими рассмотренными типами имеют наиболее низкие значения коэффициентов загрузки, соответствующие максимуму КПД по мощности и электроэнергии. Следовательно, обеспечить минимальные потери мощности и электроэнергии в этих трансформаторах можно только за счет существенного недоиспользования трансформаторной мощности.

3. При планировании режимов работы силовых трансформаторов в СЭС промышленных предприятий в качестве критерия эффективности целесообразно применять максимум годового КПД по электрической энергии.

Литература

1. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. - М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
2. Федоров, А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Федоров, В.В. Каменева. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.
3. Фурсанов, М.И. Об оптимальных режимах работы силовых трансформаторов / М.И. Фурсанов, В.Н. Радкевич // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энергетических объединений СНГ)-2008. – №2. – с.32 – 38.
4. Указания для проектирования. Выпуск 4. М.: ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект», 1988. – 16 с.