

пологические особенности графа схемы. Одним из таких методов является метод Гаусса с оптимальной стратегией упорядочивания при исключении неизвестных [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фурсанов М. И., Золотой А. А., Макаревич В. В. расчёт режимов и потерь мощности в электрических сетях 0,38 кВ с учётом повторного заземления нулевого провода // Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Энергетика. – 2007. – № 5. – С. 5 – 18.

УДК 631.371.1.027

### ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРА У/УнСУ

Протосовицкий И.В. к.т.н., доцент, Шевчик Н.Е. к.т.н., доцент  
УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»  
г. Минск Республика Беларусь

В четырехпроводных электрических сетях в основном используются трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда-звезда-ноль» (У/Ун). Однако эти самые дешевые в изготовлении, трансформаторы в эксплуатации экономичны лишь при симметричной нагрузке фаз. Реально же в сетях с большим удельным весом однофазных нагрузок равномерность их подключения во времени пофазно нарушается и потери электрической энергии в таких трансформаторах и линиях резко возрастают, кроме того, происходит резкое искажение системы фазных напряжений.

Искажение фазных напряжений в реальных условиях эксплуатации нередко вызывает их отклонение, уже на низковольтных вводах трансформатора значительно превышает нормы ГОСТ. В конце линий, по данным исследований, это отклонение напряжений приблизительно в два раза больше. При указанном качестве питания потребителей повышения в них уровня потерь электроэнергии и отказов в работе вполне естественно.

Для устранения этих недостатков эксплуатационники завышают установленную мощность трансформаторов сверх требуемой по расчету, но и это дает незначительный эффект, но вместе с тем при этом резко повышается уровень потерь электроэнергии в сети. Кроме того, токи нулевой последовательности, которые, замыкаясь через его бак, дно крышку, разогревают их, ухудшают охлаждение активной части. Это повышает температуру изоляции обмоток сверх нормы, и трансформатор, при суммарной нагрузке ниже номинальной, оказывается перегруженным. Такое положение объективно вызывает необходимость увеличения номинальной мощности трансформатора на одну, а иной раз на две ступени больше расчетной со всеми вытекающими последствиями.

Для устранения указанных недостатков разработан и все более активно начинает применяться трансформатор со схемой соединения У/УнСУ. В данном трансформаторе низкое сопротивление нулевой последовательности. Это означает существенное увеличение токов однофазного короткого замыкания, а следовательно обеспечивает легкую и надежную наладку релейной защиты и ее четкую работу при КЗ.

Проведенный анализ сетей Республики Беларусь позволил определить среднестатистическую сеть 0,4 кВ. Она имеет следующие параметры: мощность трансформатора – 100 кВА (с учетом коммунально-бытовых потребителей населенных пунктов); длина линии – 0,8 км; количество линий на одной ТП – 2,5; сечение провода линии – 35 мм<sup>2</sup>. Нагрузка линий 0,4 кВ принята пропорциональной мощности трансформатора, от которого она запитана, и считалась равномерно распределенной по всей длине линии. Время использования максимума нагрузки в году – 2000 часов. Величина тока в нулевом проводе 0,25 от номинального фазного.

Расчеты дополнительных потерь электрической энергии за счет несимметрии нагрузки были выполнены с применением метода симметричных составляющих. Они производились в зависимости от величины тока в нулевом проводе, значения которого изменялось от 0 до 0,5 номинального фазного для трансформаторов мощностью от 25 до 250 кВА. Сечение нулевого принималось равным сечению фазных проводов.

Результаты расчетов приведены в табл.1 ( $S_n$  – номинальная мощность трансформатора;

$I_{н.пр}$  – ток в нулевом проводе (в относительных единицах);  $R_{кз}$  – потери короткого замыкания;  $\Delta P$  – дополнительные потери электроэнергии в линиях сети с трансформаторами У/Ун, У/Зн по сравнению с сетью с трансформаторами У/УнСУ;  $Q$  – годовая экономия электроэнергии в сетях с трансформаторами У/УнСУ по сравнению с сетью с трансформаторами У/Ун, У/Зн).

Таблица 1–Расчеты потерь электроэнергии в трансформаторах за счет несимметрии нагрузки

$S_n$ , кВА	$I_{н.пр}$	$R_{кз}$ , Вт			$\Delta P$ , Вт		$Q$ , кВт·ч	
		У/Ун	У/Зн	У/УнСУ	У/Кн	У/Зн	У/Ун	У/Зн
100	0	1970	2265	1970	0	0	0	591
100	0,1	1941	2127	1854	28	0	229	546
100	0,2	2125	2014	1770	168	0	1026	488
100	0,25	2278	1967	1739	307	-1	1693	454
100	0,3	2492	1926	1716	509	-1	2569	418
100	0,4	3073	1863	1693	1140	-2	5037	335
100	0,5	3858	1825	1702	2150	-4	8609	238
25	0,25	633	599	530	14	0	233	139
40	0,25	979	878	777	48	0	501	203
63	0,25	1450	1278	1130	115	0	871	295
160	0,25	3272	2645	2339	828	-1	3521	611
250	0,25	4665	3694	3266	1699	-2	6196	852

Сопоставление потерь в среднестатистической электрической сети при неравномерной нагрузке с трансформаторами с различными схемами соединения обмоток показывает, что наиболее экономичной из них является схема У/УнСУ. Можно добавить и другие положительные стороны этой схемы по сравнению с У/Ун:

- отсутствие дополнительного нагрева бака потоками нулевой последовательности;
- повышение устойчивости к однофазным токам КЗ;
- значительно улучшает синусоидальность формы кривой изменения напряжения;

Поэтому протоколом по вопросам проектирования и строительства электрических сетей напряжением 0,4–10 кВ ГПО «Белэнерго» предписывается: «В целях снижения потерь электроэнергии и стабилизации напряжения в распределительных сетях 0,4 кВ при выборе трансформаторов для потребителей с коммунально-бытовой нагрузкой применять трансформаторы со схемой соединения У/Ун с симметрирующим устройством (СУ) мощностью 25–250 кВА». В данный момент в сетях белорусской энергосистемы работает более 1000 таких трансформаторов, и нареканий на их работу не было.

Естественно, что установка в трансформаторах даже такого простого симметрирующего устройства, требует дополнительных затрат на материалы и изготовление. Выполненные расчеты сроков его окупаемости в зависимости от величины тока в нулевом проводе дали результаты, приведенные в тавл.2 (ток небаланса указан в относительных единицах).

Таблица 2– срок окупаемости трансформатора У/УнСУ, лет

$I_{н.пр}$	Номинальная мощность трансформатора У/УнСУ ( $S_n$ ), кВА					
	25	40	63	100	160	250
0,1	13,5	7	5,1	4,7	2,9	1,9
0,2	3,2	1,7	1,2	1,0	0,6	0,4
0,25	2,0	1,0	0,7	0,6	0,4	0,2
0,3	1,4	0,7	0,5	0,4	0,2	0,2
0,4	0,7	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1
0,5	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

Из таблицы следует, что при среднестатистическом токе в нулевом проводе 0,25 от номинального фазного симметрирующая обмотка только у трансформаторов  $S_H=25$  кВА окупается в срок 2 года и у  $S_H=40$  кВА в срок 1 год, для всех остальных мощностей окупаемость менее года.

Трансформаторы в среднем работают около 40 лет, поэтому несложно определить итоговую прибыль предприятия, установившего в сетях 0,4 кВ с несимметричной нагрузкой фаз трансформаторы со схемой соединения обмоток У/УнСУ. Причем значительный экономический эффект получается только за счет сокращения ничем не оправданных потерь электроэнергии в линиях и трансформаторах.

УДК 631.371: 621.31

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ СО СХемой СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ТРЕУГОЛЬНИК С ЗИГЗАГОМ»

**Збродыга В.М.**, канд. техн. наук, **Янукович Г.И.**, канд. техн. наук, проф.

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»  
г. Минск, Республика Беларусь*

На кафедре «Электроснабжение» УО БГАТУ разработана схема соединения обмоток трансформатора «звезда-треугольник с зигзагом» (Y/Δ с зигзагом) [1], которая способна снижать несинусоидальность напряжений при нелинейном характере нагрузки трансформатора [2,3]. Предлагаемая схема относится к нечетной одиннадцатой группе соединения обмоток. Вторичная обмотка трансформатора не имеет нейтральной точки. Его распределительные сети могут работать только в режиме с изолированной нейтралью (система электрической сети IT [4]). Поэтому он не может быть использован в существующих распределительных общего назначения сетях в качестве силового трансформатора для электроснабжения потребителей, где низковольтные сети напряжением 0,38 кВ работают в режиме глухозаземленной нейтрали.

Однако трансформаторы со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом могут применяться в существующих электроустановках для питания различных нелинейных электроприемников пониженным трехфазным напряжением: выпрямительных схем, полупроводниковых преобразователей, электрического инструмента и приборов, ламп местного освещения. Для обеспечения пожарной безопасности эти трансформаторы должны выполняться с естественным воздушным охлаждением, так как трансформаторное масло является горючим материалом.

Электротехническая промышленность выпускает следующие серии сухих трансформаторов [5, 7], в которых возможно применение схемы соединения обмоток Y/Δ с зигзагом: ТС (трехфазные, сухие), ТСЗ (трехфазные, сухие, защищенные), ТСМ (трехфазные, сухие, многоцелевые), ТСЗМ1 (трехфазные, сухие, защищенные, многоцелевые), ТСР (трехфазные, сухие, разделительные), ТСЗР (трехфазные, сухие, защищенные, разделительные), ТСП (трехфазные, сухие, преобразовательные), ТСЗП (трехфазные, сухие, защищенные, преобразовательные) и другие.

Вышеперечисленные серии трансформаторов применяются в выпускаемых промышленностью полупроводниковых преобразователях. Следовательно, для повышения качества электроэнергии возможно применение трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом в серийно выпускаемых выпрямителях различного назначения [5-7]: ВАЗП, УЗА, В-ТПЕД, М-Т4ПЕ, В-ТПЕ, ВГ-ТПЕ, В-ТПП, КВПП, ВАК, УП, УПМ, ТЕ, ТЕР, ТВ, ТВР, В-ТППД, ВАСТ и других.

В качестве примера на рисунке 1 представлена схема трехфазного выпрямителя [8], который содержит вентили, соединенные в трехфазную мостовую схему и подключенные к вторичной обмотке трансформатора со схемой соединения Y/Δ с зигзагом.