

УДК 621.3

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Шуляк И.В.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Фурсанов М.И.

Конструкция силовых трансформаторов, состоящих из магнитопровода, обмоток и бака (для масляных трансформаторов), уже более столетия остается практически неизменной. Основные изменения происходят в области применяемых материалов и в технологии производства, как его отдельных частей, так и трансформатора в целом. Так, на смену маркам горячекатаной электротехнической стали пришли холоднокатаные, для обмоток вместо меди стали использовать алюминий, изменился также способ шихтовки магнитопровода – вместо «прямого стыка» стали применять «косой стык», а толстостенный бак с расширителем уступил место герметичному тонкостенному гофрированному баку.

Эволюционность вектора развития конструкции силового трансформатора экономически определяется противоборством двух критериев:

- требование рынка к удешевлению трансформатора в целом как товара;
- необходимость применения более дорогих технологий для изготовления трансформатора как товара с более привлекательными потребительскими свойствами.

Сформированные законом спроса и предложения рыночные цены на новые силовые трансформаторы жестко удерживают собственников трансформаторных заводов от революционного развития конструкции трансформатора, так как это приведет к его резкому удорожанию.

Но сегодня в условиях мирового дефицита энерго мощностей, постоянного роста энергопотребления и удорожания энергоресурсов вопрос об экономии энергии приобретает все большую актуальность. А сокращения потерь электроэнергии в значительной мере можно добиться именно кардинальной реконструкцией трансформатора и используемых в нем материалов.

Прежде чем сделать обзор уже выпускаемых энергосберегающих (энергоэффективных) трансформаторов, теоретически определим возможные способы повышения энергоэффективности силового трансформатора.

ГОСТ 25941-83 «Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия» рекомендует определять КПД силового трансформатора η следующей формулой

$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 \cdot \Delta P_{\text{кз}} + \Delta P_{\text{хх}}}{\beta \cdot S_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2 + \beta^2 \cdot \Delta P_{\text{кз}} + \Delta P_{\text{хх}}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{кз}}$ – мощность потерь короткого замыкания, Вт;

$\Delta P_{\text{хх}}$ – мощность потерь холостого хода, Вт;

β – коэффициент нагрузки;

$S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность трансформатора, ВА;

$\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности.

Анализируя формулу (1), можно сделать вывод, что, несмотря на нелинейность зависимости, передаваемая во вторичную цепь мощность будет увеличиваться, если:

- а) коэффициент нагрузки β будет оптимальным;
- б) коэффициент мощности $\cos \varphi_2$ будет увеличиваться;
- в) мощность потерь $\Delta P_{\text{хх}}$ будет уменьшаться;
- г) мощность потерь $\Delta P_{\text{кз}}$ будет уменьшаться.

Рассмотрим подробнее каждый из пунктов.

Пункты, а) и б): оптимальный коэффициент нагрузки – это отсутствие колебаний напряжений в сети, как в первичной, так и во вторичной. Высокий коэффициент мощности – это компенсация реактивной мощности. Таким образом, очевидной является необходимость так называемой «умной сети» («Smart Grid»). Данный термин означает построение интеллектуальной электрической распределительной сети, позволяющей на фоне устаревания основных фондов и увеличения объемов потребления повысить рентабельность, надежность и безотказность работы, а также снизить потери в сетях.

Подобные системы направлены на гораздо более эффективную эксплуатацию, оптимизацию и распределение нагрузки в сети, что снижает потребность в масштабных капитальных затратах на новые подстанции и линии электропередач. В условиях чрезвычайных происшествий «Smart Grid» позволяет быстрее реагировать на ситуацию и восстанавливать работоспособность сети. При применении различных моделей тарификации для конечных потребителей, «умная» инфраструктура обеспечивает двустороннюю связь с потребителями и активно способствует сокращению электропотребления и снижению пиковых нагрузок.

В случае силовых трансформаторов наиболее перспективным признано использование тиристорных переключателей с одной вторичной обмотки на другую, отличающуюся числом витков, что позволит скомпенсировать колебания напряжения. Реализация такого проекта повысит качество электрической энергии, что означает не только стабильность напряжения, но также и более надежную топологию энергетической сети.

Пункт в): уменьшение мощности потерь холостого хода ΔP_{xx} (потери в магнитопроводе), очевидно, связано с изменением конструкции и материала магнитопровода.

Наиболее перспективный путь снижения затрат на производство и эксплуатацию силовых распределительных трансформаторов – это применение магнитопроводов из аморфных (нанокристаллических) сплавов, при этом обеспечивается более чем пятикратное снижение потерь холостого хода трансформаторов по сравнению с магнитопроводами из холоднокатаной электротехнической стали.

Сегодня силовые распределительные трансформаторы с сердечником из аморфной стали серийно выпускаются в США, Канаде, Японии, Индии, Словакии. Всего в мире уже изготовлено около 60 – 70 тыс. единиц трансформаторов мощностью 25 – 100 кВА, примерно 1000 единиц прошли успешные многолетние испытания в различных энергосистемах. Наибольших успехов добились США и Япония. Японская фирма «Hitachi» в сотрудничестве с американской компанией «Allied Signal» выпустила на рынок гамму силовых трансформаторов (мощностью от 500 до 1 тыс. кВА), сердечник которых изготовлен из аморфного сплава. Как показали испытания, он позволяет сократить потери энергии в сердечнике трансформатора на 80% по сравнению со стальным аналогом. По оценке экспертов, если бы во всех действующих в мире трансформаторах установить сердечники из аморфных металлов, среднегодовая экономия энергии составила бы 40 млн. кВт·ч.

Недостатком сердечников из аморфных материалов является их более высокая стоимость по сравнению с традиционными материалами, так как производство таких сердечников обходится дороже в силу неотработанности технологического процесса. Еще одной проблемой является усложнение процесса изготовления сердечника по мере увеличения его размеров.

Сравнительные проектные параметры силовых распределительных трансформаторов с сердечниками из аморфного сплава и из холоднокатаной электротехнической стали представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Сравнительный анализ параметров трансформаторов

Параметры	100 кВ·А		250 кВ·А		400 кВ·А		630 кВ·А	
	АС	ЭС	АС	ЭС	АС	ЭС	АС	ЭС
Потери х.х., Вт	64	300	128	580	161	830	238	1200
Потери к.з., Вт	1617	1700	3129	3100	4457	4400	6353	6200
Напряжение к.з., %	4,42	4,5	4,37	4,5	4,5	4,5	6,06	6,0
Ток х.х., %	0,2	2,5	0,093	1,9	0,078	1,6	0,074	1,3

Пункт г): уменьшение мощности потерь короткого замыкания $\Delta P_{кз}$ (потерь в обмотках) – это инновации в конструкции обмоток силового трансформатора. В этой области наиболее интересны два направления.

Первое связано с использованием высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) материалов. Отметим следующие преимущества трансформаторов с обмотками из ВТСП-материалов: - снижение нагрузочных потерь при номинальном токе почти в два раза, что значительно увеличивает КПД трансформатора;

- уменьшение веса и габаритов трансформатора до 40%, что, в свою очередь, позволяет применять такие трансформаторы в уже существующих подстанциях без их конструктивных изменений со значительным увеличением мощности;

- свойство ограничения токов короткого замыкания, что в аварийных режимах защищает электрооборудование сети;

- значительное уменьшение реактивного сопротивления, что позволяет обеспечить стабилизацию напряжения, не прибегая к его регулированию;

- большая перегрузочная способность без повреждения изоляции и старения трансформатора;

- уменьшение уровня шума;

- пожаробезопасность и экологичность.

Основным отрицательным фактором использования ВТСП-материалов является высокая стоимость провода, изготовленного из них.

Второе направление уменьшения мощности потерь короткого замыкания – это новый тип трансформатора DryFormer фирмы «ABB», обмотки которого выполняются из специального кабеля. Этот кабель имеет многопроволочную медную или алюминиевую токопроводящую жилу, поверх которой наложен тонкий слой полупроводящего материала, что позволяет устранить неравномерность электрического поля, вызванного многопроволочностью жилы. Изоляция такой жилы изготавливается из полиэтилена, ее толщина выбирается из соображений электрической прочности (практически достижим уровень напряжения 220 кВ). Поверх изоляции наложен экран, выполненный также из полупроводящего материала, который заземляется, что обеспечивает рациональное распределение электрического поля.

Отсутствие масла, снижение более чем вдвое доли горючих материалов по сравнению с обычным трансформатором устраняют риск пожара, взрыва, загрязнения воды и почвы при повреждении трансформатора. Это позволяет применять такое оборудование в зонах с большой плотностью населения, подземных установках, экологически охраняемых регионах. Для DryFormer не нужны вводы высокого напряжения, так как кабель, которым выполнена обмотка, протягивается к распределительному устройству на любую длину.

Фактором, препятствующим промышленному применению кабельных трансформаторов, также является их высокая стоимость.

Таким образом, на сегодняшний день для повышения энергоэффективности системы электроснабжения промышленного предприятия наиболее перспективным является использование аморфных силовых трансформаторов в силу того, что кабельные трансформаторы и трансформаторы с обмотками из ВТСП-материалов все еще находятся в опытной эксплуатации.

Литература

1. Бормосов, В.А. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий / М.Н. Костоусова, А.Ф. Петренко, Н.Е. Смольская . - М.: Информэлектро, 1988.