

В.В. КУЗЬМИН, д-р техн. наук, проф., гл. специалист
АО "ЭЛТА", Харьков

В.В. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

В.С. ШПАТЕНКО, аспирант, НТУ "ХПИ"

ОСОБЕННОСТИ СИЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

На основе нового подхода к расчету электродинамических сил, возникающих в активной зоне, т.е. в обмотках и сердечнике однофазного трансформатора, выполнен анализ величины механических нагрузок, действующих на обмотки обычного и "сверхпроводящего" трансформатора.

Ключевые слова: трансформатор, механические нагрузки, действующие на обмотку.

Введение. Переходные процессы в трансформаторах возникают, как и в обычной электрической цепи, содержащей индуктивность, при всевозможных коммутациях, служащих причиной изменения токов в обмотках трансформаторов. Решить задачу о рассмотрении переходных процессов в трансформаторах при всяких изменениях их нагрузок можно с общих позиций рассмотрения переходных процессов в электрических цепях. Однако наиболее интересные процессы имеют место при подключении трансформатора к сети и при коротком замыкании на зажимах вторичной обмотки. При этом, как известно, необходимо составить и решить систему дифференциальных уравнений в мгновенной форме для цепей трансформатора. В то же время решение таких уравнений достаточно громоздко. При несинусоидальном несимметричном напряжении питания в воздушном зазоре появляются спектры временных гармоник.

При больших нагрузках тонкие листы шихтованного магнитопровода теряют устойчивость и коробятся. Для увеличения механической устойчивости кромки магнитопровода иногда провариваются по специально выштампованным лункам. Стержни и ярма шихтованного магнитопровода стягивают (прессуются) и скрепляют (фиксируются) таким образом, чтобы обеспечивались необходимые форма и размеры поперечного сечения магнитопровода. Качество магнитопровода определяет надежность работы трансформатора, т.е. всего энергетического узла.

Силовые взаимодействия в сердечнике однофазного транс-

© Кузьмин В.В., Шевченко В.В., Шпатенко В.С., 2013

форматора. Анализ статистики отказов трансформаторов показывает, что основными причинами повреждений являются:

- наличие локальных дефектов в главной и продольной изоляции, приводящих к возникновению и развитию электроразрядных процессов;

- наличие механических деформаций обмоток и магнитопроводов в результате электродинамических воздействий от протекания токов при КЗ, переходных, а иногда и номинальных, процессах.

Следовательно, основное внимание при анализе эксплуатации следует уделять:

- 1) маслосборной изоляции высокого и низкого напряжения (ВН и НН), витковой изоляции обмоток;

- 2) наличию тепловых (электрических) явлений в магнитной системе и контактах;

- 3) состоянию вводов, защитных систем, заземляющих устройств и РПН;

- 4) состоянию системы охлаждения.

В настоящее время необходимо вести все расчеты с определением надежности работы трансформаторов и с определением вероятности продолжительности их службы, что позволит оценить допустимость эксплуатации по состоянию трансформатора в целом на основе данных о потоках отказов на рассматриваемом энергетическом предприятии.

Возможность использования парка трансформаторного оборудования с учетом динамики эксплуатационной надежности следует вести по показателям:

- вероятность наступления финальной аварии для каждого трансформатора на разных промежутках времени. (Финальной аварией мы называем технологические нарушения, в результате которых трансформаторное оборудование становится неремонтопригодным);

- вероятность наступления финальных аварий на выбранных сочетаниях трансформаторов на разных промежутках времени;

- вероятная (с заданной вероятностью) продолжительность службы каждой трансформаторной единицы в зависимости от срока его работы и параметров потока технологических отказов;

- ожидаемый ущерб от наступления финальных аварий в заданной группе трансформаторов.

Результаты расчетов, основанные на статистических данных, собранных за последнее десятилетие, показывают, что результаты, получаемые на основе расчетных способов, соответствуют данным эксплуатации, [1, 2].

Теоретические расчеты во многом определяются известными математическими моделями трансформатора. Но существуют отказы, которые не укладываются в известные модели. Так, например, вопросы "отпуска" (ослабления прессовки) сердечников трансформаторов не находят объяснения.

Рассмотрим механические нагрузки, которые действуют на обмотки и сердечник трансформатора при протекании по обмоткам переменного тока.

Как показано в [3], соленоид цилиндрической формы с радиусом поперечного сечения R при длине $L \gg R$ в центральной части генерирует магнитное поле с параметрами:

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 i \text{ при } \rho < R, \\ B &= 0,5\mu_0 i \text{ при } \rho = R, \\ B &= 0 \text{ при } \rho > R, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ – радиальная координата, i – поверхностная плотность тока проводимости в обмотке или связанного тока в ферромагнетике.

При этом, независимо от природы тока i , на поверхности соленоида возникает давление внутреннего распора

$$\bar{p}_R = 0,5\mu_0 i^2 \bar{e}_\rho \quad (2)$$

Проведем рассмотрение этих сил для конкретных конструкций обмоток трансформаторов.

1. Два коаксиальных соленоида (обмотки трансформаторов), рис. 1. Для пары концентрических соленоидов с обмотками $w_1(R_1, i_1)$ и $w_2(R_2, i_2)$ давления внутреннего распора

$$\begin{aligned} p_1 &= 0,5\mu_0 i_1^2 \\ p_2 &= 0,5\mu_0 i_2^2 \\ p_{21} &= \mu_0 i_1 i_2 \\ p_{12} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Если $i_1 = i_2$, то $p_1 + p_{21} > p_2$ (4) что не является нарушением III закона Ньютона, и для рассматриваемой неконсервативной системы этот закон не приемлем.

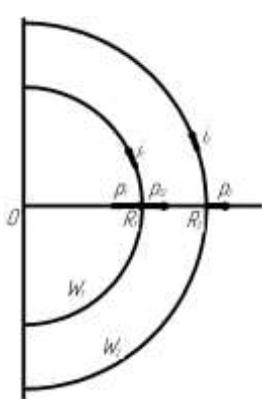


Рис. 1 – Эскиз пары соленоидов.

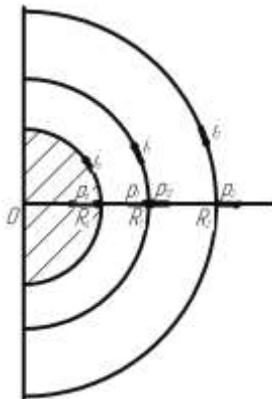


Рис. 2 – Схема поперечного сечения трансформатора.

2. Ядро трансформатора с магнитным сердечником. На рис. 2 представлена классическая конструкция схемы поперечного сечения такого трансформатора с двумя облаками w_1 и w_2 .

Здесь основную "нагрузку" по генерации магнитного поля берет на себя ферромагнетик. Например, при $B_a = 1,6$ Тл $\mu = 1500$ Гн/м, т.е. при этом $i_a = B_a / \mu_0 = 1360$ кА/м.

Напряженность поля намагничивания при этом равна

$$H_0 = 1360/1500 = 0,8 \text{ кА/м} \quad (5)$$

Для примера и для качественного анализа силовых взаимодействий (определения давления внутреннего распора) рассмотрим трансформатор с параметрами $S = 400$ МВА, $U_1 = 24$ кВ с геометрическими параметрами $D_a = 10$ м; $L_a = 2 \cdot 2$ м; $L_0 = 8$ м; $S_a \approx 0,71$ м².

В однофазном исполнении $U_{\phi} = 24/\sqrt{3} = 13,9$ кВ, $I_{\phi} = 400/24 = 16,7$ кА

Число витков первичной обмотки

$$w_1 = \frac{13900}{222 \cdot 1,5 \cdot 0,71} = 55.$$

Рассчитаем значение МДС: $F_0 = L_0 \cdot H_0 = 6,4$ кА,

$$I_0 = \frac{F_0}{w_1} = \frac{6400}{55} = 116,4 \text{ А}, \text{ что составляет около } 0,7\% \text{ от номинального}$$

тока.

С учетом потерь в стали $i_0 < 2\%$. В наших расчетах можно считать, что $I_1 \approx I_2$, т.е. при одинаковой схеме соединения обмоток

$$i_1 = i_2 = 230 \text{ кА/м}. \quad (6)$$

Отдельные элементы давления внутреннего распора можно считать:

$$p_a = 0,5 \cdot \mu_0 \cdot 1,36^2 \cdot 10^{12} = 1024 \text{ МПа (10 атм.)}$$

$$p_1 = p_2 = 0,9 \cdot \mu_0 \cdot 2,3^2 \cdot 10^{10} = 36 \text{ МПа (0,36 атм.)}$$

$$p_{21} = \mu_0 \cdot i_1 \cdot i_2 = 2 \cdot p_1; \quad \Sigma p_1 = -p_1$$

Следует отметить, что при другом, так называемом, "сепаратном" – на отдельных стержнях, расположении обмоток на стержнях трансформатора

$$p_1^* = p_2^* = 4 \cdot p_1 = 1300 \text{ МПа (1,3 атм.)}$$

$$p_{12}^* = p_{21}^* = 0$$

3. Трансформатор без сердечника, со "сверхпроводящими" обмотками.

Фактически мы предлагаем рассмотреть трансформатор без стального сердечника, что соответствует варианту выполнения трансформатора со сверхпроводящими обмотками.

Проведем исследование для сверхпроводящего трансформатора при условии сохранения геометрических размеров активной зоны и увеличения числа витков первичной обмотки пропорционально росту плотности тока в обмотке (β), например $\beta = 10$.

В этом случае ток х.х. составит

$$I_0^* = \frac{\mu_r}{\beta} I_0 = \frac{1500}{10^2} 0,7 = 10,5 \%,$$

что вполне допустимо. Проблемы оптимизации конструкции активной зоны сверхпроводящего трансформатора выходят за рамки тематики настоящей статьи.

Выводы.

1. При расчете давления внутреннего распора, действующего на катушки и шихтованный сердечник трансформатора, необходимо учитывать конструкцию и расположение этих катушек.

2. При расчете усилий, действующих на обмотки и сердечник, необходимо учитывать действие внутренних электродинамических сил, [4].

3. При разработке конструкций традиционных и сверхпроводниковых трансформаторов необходимо учитывать действие электродинамических сил, приложенных, как к магнитопроводам, так и к обмоткам.

Список литературы: 1. *Васин В.П., Долин А.П.* Финальные аварии силовых трансформаторов и анализ эксплуатационной надежности трансформаторного парка // Новое в российской электроэнергетике. – 2013. – № 8. – С. 3-11.
2. *Шевченко В.В.* Направления деятельности по обеспечению

энергоэффективности энергетики // Мир техники и технологий, № 5 (138), 2013. – С. 26-35. 3. Кузьмин В.В., Шпатенко В.С. К проблеме "нелокального" действия магнитного поля на обмотки электрических машин // Электроинформ, 2005. – № 4. – С. 14-15. 4. Кузьмин В.В., Лившиц А.Л., Шпатенко Т.В., Шпатенко В.С. Электромеханические процессы в шихтованных магнитопроводах крупных электрических машин – новый подход к описанию явлений и разработке мероприятий по предотвращению появления дефектов // Гидроэнергетика Украины, 2010. – № 4. – С. 27-31.

Поступила в редколлегию 01.10.2013



Кузьмин Виктор Владимирович, доктор технических наук, проф., лауреат Государственной Премии Украинской ССР в области науки и техники, кавалер "Ордена Дружбы народов", главный специалист АО "ЭЛГА". Защитил диплом инженера, диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1960, 1970 та 1984 гг.

Научные интересы связаны с электроэнергетикой и теоретическими основами электротехники.



Шевченко Валентина Владимировна, к.т.н., доцент, доцент кафедры "Электрические машины" НТУ "ХПИ". В 1977 г. в ХПИ защитила диплом инженера-физика. В 1981 защитила диссертацию в Ленинградском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты. Область научных интересов электроэнергетика, оптимизация параметров и технических характеристик турбогенераторов, нетрадиционная энергетика, сверхпроводимость.



Шпатенко Виктор Сергеевич, аспирант. Защитил диплом магистра в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт" в 2010 г.

Научные интересы связаны с исследованием электромагнитных и силовых процессов в крупных синхронных генераторах

УДК 621.314.222

Особенности силовых взаимодействий в активной зоне однофазного трансформатора / Кузьмин В.В., Шевченко В.В., Шпатенко В.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 51 (1024). – С. 36-42. Бібліогр.: 4 назв.

На основі нового підходу до розрахунку електродинамічних сил, які виникають в активній зоні, тобто в обмотках і сердечнику однофазного трансформатора, виконали аналіз величини механічних навантажень, що діють на обмотки звичайного і "надпровідного" трансформатора.

Ключові слова: трансформатор, механічні навантаження, що діють на обмотку.

On the base of a new approach for the calculation of electrodynamic forces calculation that arise in the active zone i.e. in windings and in the core of the single-phase transformer, the analysis of mechanical loads acting on the coils of ordinary and "superconducting" transformer is performed.

Keywords: transformer, mechanical loads acting on the winding.