

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТОРОИДАЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

*канд. техн. наук, доц. Д. А. ДОВГЯЛО,
(Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой)*

В. А. ТИХОНОВИЧ
(ООО «Юджэн»)

Рассмотрены переходные процессы, возникающие при работе тороидальных трансформаторов. Проанализированы основные методы уменьшения пусковых токов на стадиях проектирования и эксплуатации трансформаторов.

Ключевые слова: *переходной процесс, трансформатор, тороидальный сердечник, пусковой ток.*

К переходным процессам в тороидальных трансформаторах относятся: подключение трансформатора к электрической сети, скачкообразное изменение величины сопротивления нагрузки и питающего напряжения, режим короткого замыкания в первичной или вторичной сети.

Переходный процесс при коротком замыкании вторичных обмоток трансформатора. Короткие замыкания трансформатора относятся к ненормальному режиму его работы. Замыкания происходят в результате аварий в энергосистеме или в результате изменений нагрузок на вторичных обмотках. Вследствие этого трансформатор переходит в режим, при котором в первичных и вторичных обмотках протекают токи, многократно превышающие номинальные.

Рассмотрим короткое замыкание однофазного трансформатора, работающего в режиме, когда нагрузка ко вторичной обмотке не подключена. Допускаем, что напряжение сети не изменяется, а также считаем, что магнитопровод работает в режиме ниже точки насыщения, т. к. увеличенный поток вторичной обмотки размагничивает сердечник и поток взаимной индукции Φ будет уменьшаться. Представим трансформатор в виде упрощенной схемы замещения (рис. 1).

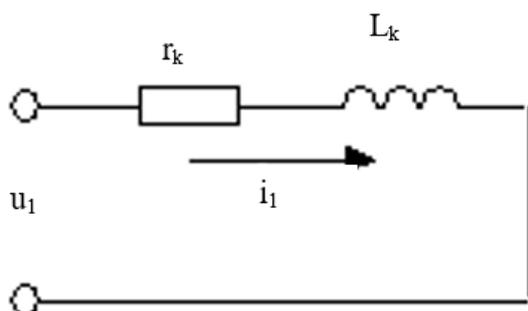


Рисунок 1. – Упрощенная схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания

В таких режимах максимальный ток короткого замыкания может достигать значений

$$i_{1max} = (20 \dots 30) \cdot i_n. \quad (1)$$

Такие повышенные токи приводят к серьезному нагреву обмоток и значительному росту электромагнитных сил, действующих на обмотки. Продолжительное действие повышенных токов оказывает значительное влияние на межвитковую изоляцию и, как следствие, возникает межвитковое замыкание, лавинообразное возрастание тока и последующее разрушение обмотки.

В настоящее время применяются релейная защита и автоматика, которая производит отключение аварийного участка за время меньше 1 секунды. За такое время обмотки трансформатора не успевают нагреваться до критических температур.

Наиболее опасным является действие электромагнитных сил. Возникновение данных сил объясняется взаимодействием полей рассеяния, обусловленных токами, протекающими по обмоткам. Известно, что сила, действующая на проводник единичной длины, равна произведению индукции поля рассеяния на ток:

$$F = B \cdot i. \quad (2)$$

При штатном режиме работы трансформатора эта сила имеет небольшие значения. Например, при токе 150 А и индукции в 0,5 Тл сила $F = 0,5 \cdot 150 = 75$ Н/м. Такая сила для обмотки трансформатора не опасна. При коротком замыкании электромагнитная сила возрастает пропорционально квадрату тока, что превышает рабочие значения в сотни раз. Электромагнитная сила изменяется с частотой 100 Гц, и, как следствие, возникают значительные деформации обмоток и вибрация магнитопровода. При значении механического напряжения, более 50–60 Н/мм², деформации становятся критическими для обмоток трансформатора и происходит их механическое разрушение.

На стадии эксплуатации основным методами борьбы с короткими замыканиями является применение релейной защиты и автоматики систем электроснабжения, обеспечивающих быстрое отключение трансформатора при коротком замыкании во вторичных цепях.

Перенапряжения в трансформаторах. Как известно, перенапряжение – это кратковременное скачкообразное изменение входного или выходного напряжений на зажимах трансформатора. Такие скачки, имеют либо периодический, либо аperiodический характер.

Основными причинами перенапряжений являются:

– коммутационные процессы – отключение, включение, изменение величины нагрузки, что сопровождается изменением электромагнитного поля трансформатора;

– явления природного характера, возникающие, например, при попадании удара молнии в электрическую сеть.

Перенапряжения при коммутации могут превышать номинальное фазное напряжение в 2–5 раз, перенапряжения из-за удара молнии могут превышать в 7–12 раз номинальные значения напряжения. Такие уровни напряжений опасны для трансформаторов, т. к. кроме увеличения электромагнитных сил могут привести к пробоев межобмоточной изоляции. Пробой изоляции приводит к выходу из строя трансформатора и нарушению нормальных условий эксплуатации установки.

Самую большую опасность представляют перенапряжения, возникающие в теле трансформатора при прохождении электромагнитной волны по обмотке. Потенциал между отдельными частями обмотки может значительно превысить напряжения в номинальном режиме. В основном повреждаются витки, ближайшие к зажимам трансформатора.

Изменения, происходящие в трансформаторе при перенапряжениях, имеют случайный характер и с трудом поддаются математическому анализу.

На этапе эксплуатации основным методом борьбы с перенапряжениями является использование устройств защиты, установленных за пределами трансформатора.

Подключение трансформатора к электрической сети. Подключение трансформатора к электрической сети сопровождается возникновением пусковых токов (ПТ) и обусловлено протеканием переходных процессов.

Необходимость теоретической и практической оценки пусковых токов вызвана тем, что при возникновении этого переходного процесса возникают токи, превышающие номинальные в десятки и сотни раз, что может вызвать срабатывание автоматических выключателей, защищающих электрическую сеть, а также подгорание пускателей и контактных групп выключателей. Длительность переходного процесса, характеризующегося возникновением пусковых токов, составляет от 10 до 50 мс.

Возникновение пусковых токов вызвано переходом сердечника в режим насыщения. Поэтому следует проектировать трансформатор, работающий при индукции значительно меньшей, чем индукция насыщения. Однако такой трансформатор будет очень материалоемким и дорогим [1].

При подаче переменного напряжения на трансформатор всегда возникает переходный процесс. Из-за наличия в магнитном поле катушки сердечника рост тока приводит к проявлению ярко выраженных нелинейных свойств [2–4]. Для линейной индуктивности ток может вдвое превышать амплитуду тока в установившемся режиме. При токе, увеличенном в два раза, напряженность магнитного поля также увеличивается практически вдвое, а значит, сердечник входит в область

насыщения [5]. При этом магнитная проницаемость материала сердечника резко падает, что соответственно уменьшает индуктивность первичной обмотки:

$$L = \frac{\mu_0 \mu N^2 S}{l}, \quad (3)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость сердечника;

μ_0 – магнитная постоянная, $4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

N – количество витков в обмотке;

S – площадь поперечного сечения магнитопровода, м²;

l – длина средней линии магнитопровода, м.

В свою очередь, происходит уменьшение реактивной составляющей полного сопротивления обмотки, ток через обмотку возрастает еще больше [6].

Мгновенное значение тока в катушке состоит из двух составляющих [3]:

1 – синусоидальной составляющей тока с амплитудой I (ток в катушке в установившемся режиме);

2 – составляющей, которая затухает по экспоненциальному закону с наибольшим по модулю значением $|I \cdot \cos \phi|$:

$$i \approx |I \cdot \cos \phi| \cdot e^{-\frac{R}{L}t} - I \cdot \cos(\omega t + \phi), \quad (4)$$

где ϕ – угол фазового сдвига, град;

ω – циклическая частота, с⁻¹;

R – активное сопротивление обмотки, Ом;

L – индуктивность первичной обмотки, Гн.

Из (4) следует, что при снижении индуктивности L первая составляющая резко возрастает и определяется в основном активным сопротивлением обмотки, которое значительно меньше индуктивного сопротивления в установившемся режиме [7].

Следует отметить, что значительные ПТ возникают не всегда. Если в момент включения мгновенное значение питающего напряжения близко к амплитудному, то первичная обмотка ведет себя как идеальная индуктивность и ПТ не возникают.

Во всех других случаях переходной процесс становится более ярко выраженным, т. е. его характер зависит от начальной фазы источника переменного напряжения (фазы в момент включения).

В трансформаторах малой мощности [8] процесс включения протекает намного быстрее и сопровождается меньшими бросками тока. Броски тока при включении неопасны для трансформатора, но необходимо настраивать систему защиты электрических цепей таким образом, чтобы не было ложных отключений автоматических выключателей.

Практическая формула для вычисления ПТ согласно [3] имеет вид

$$i \approx \frac{l}{W\mu_2} \left[\frac{2u_m}{WS\omega} - h(\mu_1 - \mu_2) \right], \quad (5)$$

где l – средняя длина магнитной линии сердечника, мм (см. рисунок 1)
 W – количество витков первичной обмотки трансформатора;
 S – сечение магнитопровода, мм²;
 h – высота магнитопровода, мм;
 ω – циклическая частота, с⁻¹;
 u_m – амплитуда приложенного напряжения, В;
 μ_1 – дифференциальная магнитная проницаемость на рабочем участке кривой намагничивания;
 μ_2 – магнитная проницаемость, полученная в результате экстраполяции начального участка кривой намагничивания.

Выражение (5) позволяет оценить пиковое значение тока в момент перехода фазы напряжения через ноль (наихудший случай). При использовании этого выражения для расчетов токов должны быть известны геометрические параметры магнитопровода и количество витков обмоток трансформатора.

На стадии конструирования трансформаторов основными методами, уменьшающими пусковые токи являются:

1. Проектирование трансформатора со сниженной магнитной индукцией. Это достигается либо увеличением числа витков первичной обмотки при сохранении размеров магнитопровода, либо увеличением сечения магнитопровода с сохранением исходного количества витков. Основной недостаток – увеличение стоимости трансформатора.

2. Применение неотожженного сердечника (для тороидального исполнения). К основным недостаткам этого способа относятся увеличение тока холостого хода (потерь в стали) и уменьшение линейности тока.

3. Использование разрезного сердечника (либо сердечников) с немагнитным зазором. Это также приводит к увеличению стоимости изделия, возрастанию тока холостого хода (потерь в стали).

4. Использование технологии «Unicore» [2] в случае использования Ш-образного сердечника. Технология «Unicore» позволяет получить распределенный по стержню зазор, который не приводит к резкому увеличению потерь. Следует отметить, что эта технология не реализована для тороидальных магнитопроводов.

На стадии эксплуатации основные методы связаны с выбором устройства ограничения ПТ:

- коммутационные устройства, подключающие трансформатор к питающей сети в момент, когда сетевое напряжение имеет амплитудное значение ($\varphi = \pi / 2$);

– использование токоограничивающего резистора и последующее его шунтирование контактами магнитного пускателя (реле), при этом необходимо обеспечить защиту резистора от перегрева (дополнительный автоматический выключатель, радиатор) в случае выхода из строя магнитного пускателя;

– использование терморезистора, имеющего в момент включения трансформатора токоограничивающее сопротивление, уменьшающееся по мере нагрева. Способ подходит для трансформаторов небольшой мощности;

– выбор автоматического выключателя с соответствующей характеристикой срабатывания (кратностью относительно номинального тока) – типы А, В, С, D.

Ограничивать ПТ маломощных трансформаторов в большинстве случаев не требуется, т. к. активное сопротивление их первичной обмотки составляет от десятков Ом до нескольких тысяч Ом [9]. Соответственно, ПТ таких трансформаторов даже при уменьшении индуктивного сопротивления до нуля будут составлять не более 10 А.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бальян, Р. Х. Трансформаторы для радиоэлектроники / Р. Х. Бальян. – М. : Советское радио. – 1971. – 720 с.
2. Маклиман, В. Проектирование трансформаторов и дросселей. Справочник / В. Маклиман. – 3-е изд., пересм. и доп. ; пер. с англ. Попова В. В. – М. : ДМК Пресс, 2016. – 476 с.
3. Котенёв, Е. С. Расчет и оптимизация тороидальных трансформаторов / Е. С. Котенёв, А. Н. Евсеев. – М. : Горячая линия. Телеком, 2011. – 287 с.
4. Игнатович, В. М. Электрические машины и трансформаторы : учеб. пособие / В. М. Игнатович, Ш. С. Ройз. – Томск : ТПУ, 2013. – 182 с.
5. Присмотрова, Л. К. Проектирование силовых и специальных трансформаторов / Л. К. Присмотрова, Е. Н. Пировских, А. В. Пировских. – Киров : ВятГУ, 2006. – 246 с.
6. Грунтович, Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования : учеб. пособие / Н. В. Грунтович. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М. – 2013. – 269 с.
7. Быстрицкий, Г. Ф. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов / Г. Ф. Быстрицкий, Б. И. Кудрин. – М. : СИНТЕГ, 2015. – 176 с.
8. Белопольский, И. И. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности / И. И. Белопольский. – М. : ЁЁ Медиа – 2018. – 161 с.
9. Вильям, Маклиман. Проектирование трансформаторов и дросселей / Маклиман Вильям. – М. : ДМК Пресс. – 2016. – 176 с.
10. Ермолин, Н. П. Как рассчитать маломощный силовой трансформатор / Н. П. Ермолин. – М. : Энергетическое издательство. – 2016. – 620 с.