

УДК 621.311.153

П.Ю.Красовский

(Украина, г.Днепропетровск, Национальный горный университет)

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Технические потери электроэнергии при ее транспортировке в распределительных сетях являются основой норматива, определяющего экономически обоснованный технологический расход электроэнергии [2]. В городских (распределительных) электрических сетях значительной составляющей потерь электроэнергии (до 30%) являются потери холостого хода (ХХ) трансформаторов P_{xx} [1]. Снижение коэффициентов загрузки трансформаторов вследствие перераспределения электроэнергии увеличивает долю потерь ХХ в суммарных потерях в трансформаторах. При расчетах баланса энергии потери P_{xx} в трансформаторах принимаются равными паспортному значению $P_{xx \text{ пасп}}$. На практике паспортное значение $P_{xx \text{ пасп}}$ не всегда соответствует реальным потерям в трансформаторе и для разных трансформаторов различие может быть значительным. Неточное задание P_{xx} приводит к существенной ошибке в расчетах отпуска электроэнергии. Можно утверждать, что потери электрической энергии в силовых трансформаторах изменяются во времени и динамика этих изменений зависит как минимум от срока и условий эксплуатации, а также от видов и количества повреждений трансформаторов и качества их ремонта.

По данным ОАО "Укрелектроаппарат" (г. Хмельницкий) в Украине на сегодня находится в эксплуатации 197360 силовых трансформаторов. На основании анализа технического состояния и характеристик трансформаторов мощностью 25-2500 кВ·А напряжением до 35 кВ установлено, что 75 % из них было изготовлено в 1970-1980 годах. В эксплуатации находятся трансформаторы проработавшие 40 и более лет, в то время как нормативный срок службы силовых трансформаторов составляет 25 лет. На подавляющем большинстве предприятий в связи с финансовыми трудностями трансформаторы заменяют

в зависимости от их фактического состояния, и в ближайшие годы провести замену устаревшего оборудования не представляется возможным. Это приводит к тому, что значительное количество трансформаторов эксплуатируется сверх нормативного и номинального сроков использования. Согласно [10] число таких трансформаторов на некоторых РЭС приближается к 80% от числа установленных.

Цель настоящей статьи:

- определить структуру потерь ХХ в трансформаторах;
- рассмотреть современные представления о физических процессах, протекающих в электротехнической стали в условиях её эксплуатации;
- проанализировать факторы, влияющие на структурные составляющие потерь [16].

Результаты исследований.

Анализ повреждений силовых трансформаторов показал, что большая часть повреждений характерна для всех видов трансформаторов вне зависимости от условий эксплуатации (около 80% всех повреждений). Особенности эксплуатации влияют лишь на возможность более раннего возникновения неисправности и тяжесть повреждений [13]. Обозначим основные повреждения и эксплуатационные режимы, приводящие к увеличению потерь холостого хода P_{xx} за счет ухудшения магнитных свойств стали сердечника (процессы старения стали) и понижения качества трансформаторного масла.

Повреждения магнитопровода.

1. Дефектность межлистовой изоляции, причиной которой являются перегревы, вызываемые вихревыми токами или токами в короткозамкнутых контурах, образующихся в результате нарушения изоляции активной стали в местах соприкосновения со стяжными шпильками, наличия забоин и т.п., а также нарушения схемы заземления. Влага, которая конденсируется на поверхности масла, попадает на верхнее ярмо, проникает между пластинами активной стали в виде водомасляной эмульсии (смеси влаги с горячим маслом), разрушает межлистовую изоляцию и вызывает коррозию стали.

2. Местное замыкание пластин стали и "пожар" в стали из-за наличия каких-либо посторонних металлических или токопроводящих частиц, замыкающих в данном месте пластины стали, повреждения изоляции стяжных шпилек, создающее короткозамкнутый контур, касания какой-либо металлической части и стержня в двух точках.

3. Повреждение изоляции пластин стали, вызывающего замыкание пластин стали, неправильного заземления, создающего короткозамкнутый контур разрушения или отсутствия изолирующих прокладок в стыках стыкового магнитопровода.

4. Повреждение изоляции пластин стали магнитопровода вследствие повышенной вибрация магнитопровода из-за ослабления прессовки магнитопровода, самопроизвольного разболчивания и свободного колебания крепежных деталей, колебания отстающих крайних листов стали в стержнях или ярмах, ослабления прессовки стыков, пробоя или разрушения изолирующих прокладок в стыках.

Повреждения обмоток.

1. Витковое замыкание, возникающее при разрушении витковой изоляции из-за старения в результате естественного износа или длительных перегрузок при недостаточном охлаждении, нарушении изоляции витков из-за механических повреждений в результате толчков или деформации обмоток при коротких замыканиях и других аварийных режимах, обнажении обмоток вследствие понижения уровня масла, дефектах изоляции провода или самого провода, незамеченные при изготовлении обмоток.

2. Обрыв в обмотках из-за отгорания выводных концов вследствие электродинамических усилий при коротких замыканиях или из-за плохих соединений, выгорания части витков вследствие виткового замыкания в обмотке.

3. Пробой на корпус из-за дефектности главной изоляции вследствие старения или наличия трещин, ползучего электрического разряда по изоляции из электрокартона, понижения уровня масла, попадания влаги или грязи, перенапряжения, деформации обмоток при коротких замыканиях.

4. Обрыв одного или нескольких параллельных проводов в витке обмотки из-за отгорания выводных концов вследствие электродинамических усилий при коротких замыканиях или из-за плохих соединений.

Ухудшение свойств трансформаторного масла.

1. Ненормальное повышение температуры масла и местные нагревы из-за неисправности в системе охлаждения, перегрузки трансформатора, внутреннего повреждения в трансформаторе.

2. Ухудшение качества масла по причине внутренних повреждений, сопровождающихся крекинг-процессом (когда газообразные продукты разложения масла растворяются в остальном масле), сильным выделением горючих газов.

Согласно [14] зачастую не учитывается тот факт, что капитальный ремонт может вызывать увеличение потерь мощности холостого хода (ХХ) по сравнению с их паспортными значениями. В некоторых случаях увеличение потерь ХХ может быть весьма существенным. Основными причинами этого являются:

- механические воздействия на электротехническую сталь магнитопровода (удары по стали, перегибы пластин, набрасывание пластин друг на друга, резка пластин и закатка заусенцев, опрессовка магнитопровода);
- применение электротехнических сталей с худшими магнитными характеристиками, по сравнению с заложеной в магнитопроводе, при осуществлении замены выгоревших пластин;
- проведение ремонта без замены поврежденных пластин, когда их равномерно распределяют по сечению магнитопровода;
- использование старой магнитной системы (с увеличением срока эксплуатации трансформатора происходит рост потерь мощности холостого хода [15]).

В процессе длительной эксплуатации силовых трансформаторов реальные значения их мощности холостого хода изменяются во времени по следующим причинам:

1. При плохой изоляции листов стали в сердечнике появляется путь для замыкания вихревых токов между листами стали, что в свою очередь может вызвать увеличение потерь ХХ на 10-30% [5].

2. При работе трансформатора в течение длительного времени ослабляется сжатие листов шихтованного сердечника стяжными шпильками или бандажками, что приводит к частичной распрессовке сердечника трансформатора, вследствие чего появляются паразитные зазоры на пути замыкания потока взаимной индукции. В результате происходит увеличение до 10% тока ХХ трансформатора [7]. Одновременно растут потоки рассеяния, вызывающие повышение мощности потерь на путях замыкания этих потоков (в стали бака и других стальных конструктивных элементах – до 20%). Повышение потерь ХХ, соответствующее этим процессам, может достигать 5%.

3. Имеющие место в процессе работы трансформатора перегревы (из-за КЗ, ухудшения условий теплоотвода вследствие старения трансформаторного масла и др.) выше допустимых значений приводят к ухудшению магнитных свойств стали сердечника (повышение температуры в течение длительного времени способствует структурным изменениям называемыми процессами старения), увеличению тока ХХ и повышению P_{xx} , которое с течением времени может достигать 4% [6,8,11,12].

4. С ростом срока службы трансформатора происходит ухудшение диэлектрических свойств изоляции обмоток и выводов, трансформаторного масла, в результате происходит снижение сопротивления изоляции, возрастают токи утечки и, как следствие, повышаются диэлектрические потери (они могут достигать 10% полного значения потерь холостого хода в высоковольтных трансформаторах [7]).

5. Некачественная перешихтовка магнитопровода при ремонте трансформатора приводит к повышению потерь ХХ до 20%. Замена стали сердечника другой маркой стали (горячекатанной на холоднокатанную), прямых стыков на косые приводит к изменению потерь в магнитопроводе [7]. Дополнительная механическая обработка листов электротехнической стали повышает потери в магнитопроводе на 5-10% [8]. Отжиг пластин стали снижает удельные потери в них на 15% [7], но одновременно ухудшает магнитные свойства электротехнической стали магнитопровода и повышает ток ХХ до 20% с ростом электрических потерь от него в первичной обмотке.

Существенно на изменение потерь ХХ трансформатора влияет изменение при ремонте обмоточных данных, изоляционных промежутков, замена трансформаторного масла и твердой изоляции обмоток и выводов. При изменении соотношения напряжения и числа витков в первичной обмотке изменяется магнитный поток в трансформаторе и пропорционально квадрату этого изменения изменяются потери ХХ в трансформаторе. Кроме того, при работе трансформатора с несимметричной нагрузкой возникают магнитные потоки нулевой последовательности и, как следствие, дополнительные потери ХХ.

Изменение P_{xx} с течением времени работы подтверждается результатами специальных измерений на 13 трансформаторах ТМ 250/10 со сроком службы от 2 до 34 лет [9]. Максимальные потери ХХ были выявлены у трансформатора с наиболее продолжительным сроком эксплуатации. Данные показали, что при расчетах норматива потерь распределительных сетей с высшим напряжением 6-10 кВ необходимо учитывать реальные, а не паспортные значения потерь ХХ трансформаторов, соответствующие сроку их службы.

В [1] был проведен анализ данных испытаний 143 разных трансформаторов мощностью 100-400 кВ·А, напряжением высшей обмотки 6-10 кВ и сроками эксплуатации трансформаторов от 1 до 51 года. В составе трансформаторов имелись трансформаторы с P_{xx} на 60% больше $P_{xx,пасп.}$. Расчеты показали, что при учете увеличения потерь ХХ трансформаторов в процессе эксплуатации реальные потери во всех 143 трансформаторах на 15,5% превышают расчетное значение, полученное при использовании паспортных данных (для трансформаторов старше 20 лет это превышение составило 19%). Средний рост P_{xx} всех трансформаторов со сроком эксплуатации более 20 лет составляет 1,75%/год, до 20 лет – потери холостого хода принимают равными паспортным с погрешностью до 8%.

Выводы.

1. С ростом срока службы трансформатора наблюдается дефектность межлистовой изоляции магнитопровода, нарушения изоляции активной стали в местах соприкосновения со стяжными шпильками, наличия забоин, ухудшение диэлектрических свойств изоляции обмоток и выводов, трансформаторного масла и т.п., что в результате приводит к увеличению значений вихревых токов, снижению сопротивле-

ния изоляции, возрастанию токов утечки и, как следствие, повышению потерь в трансформаторах.

2. При расчетах баланса энергии потери холостого хода в трансформаторах принимаются равными паспортному значению, однако на практике это не всегда соответствует реальным потерям в трансформаторе и для разных трансформаторов различие может быть значительным и определяется в основном сроком (длительностью) и условиями эксплуатации.

3. С целью повышения качества расчетов норматива потерь для распределительных сетей с высшим напряжением 6-10 кВ необходимо учитывать реальные, а не паспортные значения потерь холостого хода трансформаторов, соответствующие сроку их эксплуатации.

Список литературы

1. Казаков Ю.Б. Учет изменения потерь холостого хода трансформаторов в период срока службы при расчете потерь в распределительных сетях. / Ю.Б. Казаков, А.Б.Козлов, В.В. Коротков // Электротехника: науч.-техн. журн. - М.: ЗАО "Знак". - 2006. - №5. - С. 11 - 16.
2. Воротницкий В.Э. Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. / В.Э. Воротницкий, М.А. Калинкина // учебно-методическое пособие, 3-е стереотип. изд. - М. ИПКГосслужбы. - 2003. - 64 с.
3. ГОСТ 11920-85. Трансформаторы трехфазные силовые масляные общего назначения мощностью от 25 до 630 кВ·А на напряжение до 35 кВ включительно. Технические условия. - 24 с.
4. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. - 48 с.
5. Каганович, Е.А. Испытание трансформаторов мощностью до 6300 кВА и напряжением до 35 кВ Текст. / Е.А. Каганович, И.М. Райхлин. - М.: Энергия. - 1980.-312 с.
6. Алексеев Б. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. - М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, - 2002. - 216 с.
7. Алексеенко Г.В. Испытание мощных трансформаторов и реакторов. / Г.В. Алексеенко, А.К. Ашрятов, Е.А.Веремей, Е.С.Фрид. - 2-е изд., перераб. - М.: Энергия. - 1978. - 520 с., ил.
8. Холоднокатаные электротехнические стали: Справочник. - М.: Металлургия. - 1989. - 168 с.
9. Молотилов Б.В. Холоднокатаные электротехнические стали: Справочник / Б.В. Молотилов, Л.В. Миронов, А.Г. Петренко и др. // Под ред. Б. В. Молотилова. - М.: Металлургия. - 1989. - 168 с.
10. Казаков Ю.Б., Коротков В.В., Чирков В.А. Изменение мощности потерь XX трансформаторов распределительных сетей 6-10 кВ в процессе эксплуатации // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 24. - СПб.: ПЭИПК. - 2004. - С.124-129.
11. Заугольников В.Ф. Некоторые аспекты экономичной работы силовых трансформаторов. / В.Ф. Заугольников, А.А. Балабин, А.А. Савинков // Промышленная энергетика. - 2006. - № 4. - С. 10 - 14.
12. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. - М.: Энергия. - 1974.
13. Казаджан Л.Б. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов / Под ред. В.Д. Дурнева. - М.: ООО "Наука и технологии". - 2000. - 224с., ил.
14. Степанов В.М. Технические решения по диагностике силовых трансформаторов. / В.М. Степанов, К.А. Андреев // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 6: в 2 ч. - Тула: Изд-во ТулГУ. - 2011. - Ч. 1. С.74-81.
15. Балабин, А.А. Повышение достоверности расчета потерь электроэнергии в трансформаторах 10(6)/0,4 кВ [Текст] / А.А. Балабин, Ю.Д. Волчков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2009. - №4. - С. 22-23.
16. Волчков Ю.Д. Повышение достоверности оценки величины расхода электроэнергии на ее трансформацию в силовых трансформаторах / Ю.Д. Волчков, А.А. Балабин // Сборник материалов Международной выставки-интернет-конференции "Энергообеспечение и безопасность". - Орел: ОрелГАУ. - 2005. - С. 117-122.
17. Цищорин А.Н. О физических процессах изменения магнитных свойств электротехнической стали и росте потерь холостого хода силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации. // Электротехника: науч.-техн. журн. - М.: ЗАО "Знак". - 2011. - № 3.

Рекомендовано до друку проф. Разумним Ю.Т.