

УДК 621.3.04

ИСПЫТАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ИМПУЛЬСОМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Машковский Р.А., магистрант гр. ЭПм-181, I курс
Научный руководитель: Захарова А.Г., д.т.н., профессор
Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева
г. Кемерово

Незапланированное прекращение производства - затратный процесс для любых предприятий. Особенно на важных объектах, где причиной остановки является, скажем, повреждение электродвигателя, стоимость простоя которого в течение одного часа может составлять десятки тысяч, а то и миллионы рублей. В ходе тестирования электрических машин основная цель заключается в уменьшении до минимальных значений простоев и внеплановых остановок.

В течение долгого времени производители электродвигателей, фирмы, которые занимаются ремонтом электрических машин, а также специалисты по надежности электрических машин все больше дискутируют на тему преимуществ испытания электрических машин импульсом высокого напряжения. Вопросы о преимуществах и результатах испытаний стали темой бурных дискуссий во многих компаниях. Одни считают, что сам процесс нахождения пробоев в изоляции электрических машин путем проведения испытания импульсом высокого напряжения разрушает диэлектрическую изоляцию. Другие, напротив, уверены, что испытание высоким напряжением совершенно необходимо для тестирования изоляции.

Испытание высоким напряжением, испытание на определение индекса поляризации и испытания на сопротивление изоляции - все они проводятся в целях обнаружения проблем пробоя (утечки) корпусной изоляции на землю, а испытанием импульсом высокого напряжения обследуется состояние изоляции между фазами, слоями, и витками в обмотках электрических машин. Обнаружение короткого замыкания обмотки и повреждений изоляции в электрообмотке также возможно только с использованием импульсных испытаний. Выполнение таких испытаний позволяет предупредить возникновение неисправностей и, как следствие, повреждений изолирующих материалов, электродвигателей и катушек всех типов.

Главной целью испытания импульсом высокого напряжения является выявление ослабления изоляции, так как другими высоковольтными испытаниями его невозможно обнаружить. Впоследствии повреждение изоляции обмоток электрических машин в большинстве случаев становится причиной пробоев корпусной изоляции, что нередко может привести к трагичным ре-

результатам. Проблемы с межвитковой изоляцией отчетливо выявляются при испытании импульсом высокого напряжения.

Испытаниям подвергают все элементы изоляции обмотки (витковую, междуфазную, корпусную изоляцию) или изоляционной конструкции (коллекторные манжеты, межламельную изоляцию, изоляцию втулок контактных колец и т. п.).

Выполнение импульсного испытания осуществляется путем пропуска, через испытываемую обмотку быстро нарастающего импульса высокого напряжения, вследствие чего по всей обмотке создается распределение падений напряжения. Если изоляция между фазами, витками или слоями ослаблена, а напряжение при этом довольно высокое, то между проводами будет искрение, которое на экране воспроизводится в виде изменения кривой формы волны импульса по отношению к заданной форме.

Импульсное испытание обмотки проводится при помощи высоковольтного импульсного генератора (в составе тестера). Импульсный генератор в действительности является большой емкостью в контуре этой модели, а катушка представляет собой индуктор. Данные элементы представляют из себя резонансный LC контур. На экране отражением этого импульса будет затухающая синусоида.

Резонансная частота f пропорциональна квадратному корню индуктивного сопротивления обмотки и емкости импульсного генератора, и рассчитывается по формуле:

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

где $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Индуктивное сопротивление обмотки определяется ее геометрией (зоной размещения катушки, количеством витков, и т.д.) и магнитной проводимостью железного сердечника. Пробои (утечки) в межвитковой изоляции уменьшают индуктивное сопротивление обмотки, в результате чего наблюдается результирующий сигнал в виде затухающей синусоиды с более высокой частотой и с меньшей амплитудой формы волны.

Как правило, при испытании импульсом высокого напряжения производится сопоставление сигналов испытываемой обмотки с результирующим сигналом заведомо рабочей катушки. Кривая формы волны обмотки с аналогичным индуктивным сопротивлением и не имеющей замкнутых витков, аналогична соответствующему сигналу заведомо рабочей обмотки. Обмотка с другим индуктивным сопротивлением (или же имеющая замкнутые витки) имеет форму волны, отличную от формы волны заведомо рабочей катушки.

В актуальных, на данный момент, тестерах отражение импульса напряжения исправной обмотки переводится в цифровую форму и сохраняется. Сигналы испытываемых обмоток сравниваются с оцифрованной формой волны. При выявлении пробоев испытание прекращается, сохраняя диэлектрическую целостность. Что дает прибору возможность определять неисправности без

вмешательства оператора, и что, в свою очередь, обеспечивает высокий уровень повторяемости. Данные записываются и сохраняются в базе данных для будущей работы. В тестере рассчитаны максимальные испытательные напряжения, которые зависят от номинального напряжения (таблица 1).

Таблица 1 - Максимальные испытательные напряжения в зависимости от номинального напряжения

Номинальное напряжение	Максимальное испытательное напряжение
110 В	1900 В
230 В	2200 В
400 В	2700 В
500 В	3000 В
660 В	3500 В
Максимум	Напряжение ограничивается максимальными возможностями тестера

На настоящий момент испытание импульсом высокого напряжения многогранно и используется в производстве электродвигателей, катушек, датчиков и обмоток всех типов для определения качества изоляции. Для определения качества изоляции обмоток производители электрических машин и фирмы, занимающиеся их ремонтом, осуществляют импульсные испытания.

В многочисленных программах по предупредительному ремонту импульсное испытание применяется как способ определения качества изоляции ответственных электрических машин, установленных на различных заводах, шахтах, предприятиях нефтепереработки и т.п. В процессе эксплуатации диэлектрическая прочность изоляции в течение срока службы постепенно снижается (старение изоляции). Элементы факторов, отрицательно сказывающиеся на качестве изоляции, представлены на рисунке 3.

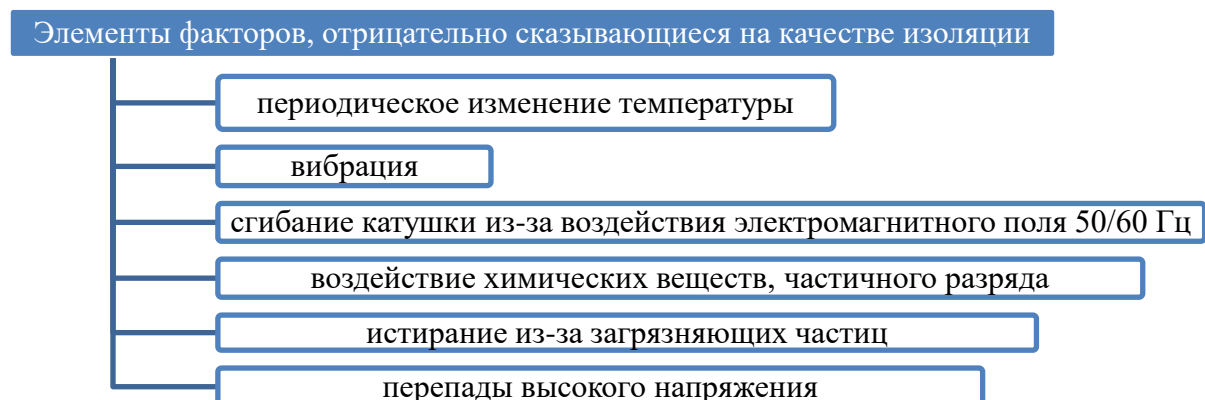


Рисунок 1 - Элементы факторов, отрицательно сказывающиеся на качестве изоляции.

Гарантией поддержания нормального и продуктивного процесса эксплуатации для операторов электрических машин является уверенность в надежной изоляции. При верно выполненном импульсном испытании можно убедиться в прочности изоляции. Оно является в наибольшей степени простым и быстрым способом подтверждения работоспособности электродвигателя.

При контроле качества изоляции электродвигателей рассматриваются два типа изоляционных систем:

- корпусная изоляция (между электрическими элементами электрической машины и землей);
- изоляция между витками, слоями и фазами.

При нормальном состоянии изоляции электродвигатель может выдерживать ежедневные перепады напряжения, возникающие при его запуске и остановке. Однако, со временем изоляция «стареет».

В работе [1], над которой работала группа специалистов, было сделано следующее заключение: электродвигатели получают в среднем 3 импульса напряжения во время запуска при нормальной эксплуатации. Немногие электродвигатели могут получать в среднем до 4,6 импульсов напряжения.

В новом электродвигателе диэлектрическая прочность изоляции должна превышать перепады, возникающие при нормальной его эксплуатации. Со временем эта прочность изоляции электродвигателя снижается и может стать ниже уровня амплитуд перепада напряжения. В связи, с чем происходит резкое снижение прочности изоляции. При снижении диэлектрической прочности изоляции в момент достижения уровня рабочего напряжения происходит ее пробой и отказ электродвигателя.

Высоковольтные испытания новых электродвигателей доказывают, что диэлектрическая прочность системы изоляции электродвигателя превышает минимальное напряжения питания. При повторных высоковольтных испытаниях во время диагностического обслуживания выявляются электродвигатели с изоляцией, величина сопротивления которой понизилась до уровня возможного пробоя. Такие электродвигатели рекомендуется отремонтировать или заменить во время запланированного их отключения при диагностике, чем дожидаться незапланированного отключения электродвигателя из-за пробоя изоляции во время его эксплуатации.

В [2] показано, что межвитковое замыкание в обмотке статора асинхронной машины приводит к прохождению тока большой величины по замкнутым виткам - примерно двукратного тока короткозамкнутого ротора.

Если такое замыкание не было выявлено вовремя, то оно начинает в дальнейшем распространяться по другим виткам, что приводит к замыканиям между фазой и землей и замыканиям между фазами. Ток замыкания на землю приносит непоправимый ущерб статору, что, вероятно, может привести и к выходу машины из строя полностью. Поэтому раннее обнаружение витковых замыканий является очень важным, ведь благодаря этому можно не только

избежать опасных условий работы оборудования, но и исключить его возможный отказ и последующий простой по этой причине.

С середины XX века началось производство высоковольтных тестеров для испытания электрических обмоток. В первоначальных испытательных приборах была использована методика сравнения сигналов различных обмоток, но и на сегодняшний день этот метод испытания применяется. Как правило, при испытании методом сравнения сигналов обмотки двух фаз трехфазного электродвигателя одновременно испытываются и затем результаты сравниваются. Данный метод предоставляет возможность определить отклонения между фазами, а именно: это замыкания, обрывы и противоположное направление намотки катушек. В программном обеспечении цифровых приборов для испытания импульсом напряжения компанией «BakerInstrument» при автоматическом сравнении сигналов фаз учитывается коэффициент оценки погрешности по площадям между формами кривых — «Line-LineErrorAreaRatio (L-LEAR)». Сигнал каждой фазы оцифровывается при запрограммированном испытательном напряжении. Общая площадь, заключенная между кривыми отражения сигнала различных фаз, рассчитывается математически для того, чтобы оценить - имеется ли какое-нибудь отклонение параметров форм волны обмоток какой-либо фазы, недопустимое для дальнейшей эксплуатации оборудования.

Однако, существовали и определенные положительные достижения в методах испытаний и анализе формы волны, которые позволили усовершенствовать методику импульсного испытания. К одному из таких достижений можно отнести учет в программе тестеров коэффициента оценки погрешности по площадям, заключенным между формами кривых при различных импульсах — «Pulse-PulseErrorAreaRatio (P-PEAR)». При помощи «P-PEAR», компании «BakerInstrument» получилось проводить более точный математический анализ формы волны, достаточный для распознавания наиболее незаметных на глаз отличий в процессе тестирования обмоток при медленном повышении испытательного напряжения до максимального уровня, и таким образом повысить класс точности собственно тестера. Программа тестера обеспечивает постепенное повышение испытательного напряжения маленькими шагами по фазе на каждый шаг.

Программное обеспечение тестера с помощью коэффициента «P-PEAR» с ростом напряжения разработано для математического расчета погрешности площадей между формами кривых отражения импульсов напряжения при сравнении форм волны отражения, следующих друг за другом импульсов напряжения. После этого тестирование автоматически останавливается, если изменения частоты формы кривой выходят за пределы установленного разрешения. В дальнейшем это предотвращает последующий рост испытательного напряжения, который может способствовать повреждению изоляции. Данный технический прием целесообразен в использовании при проведении планово-предупредительных ремонтов.

Таким образом, в наибольшей степени результативным средством для обнаружения проблем межвитковой изоляции на ранней стадии является импульсное испытание обмоток электродвигателей. Проводя данное испытание, сервисный техперсонал имеет возможность вовремя произвести ремонт или замену электродвигателей с нарушенной изоляцией, что позволяет сэкономить средства. Постоянный опыт использования этого метода тестирования на практике и множество экспериментов с обмотками доказали, что изоляция при импульсном испытании обмоток не разрушается.

В 1926 году Дж. Л. Райландер представил всеобщему вниманию методику импульсного испытания, где используемое оборудование было тяжелым и громоздким. С течением времени оборудование и процесс этого испытания кардинально изменились. На сегодняшний день используемые приборы портативны и управляются компьютером, просты в применении и обладают высокой точностью, в результате чего результаты испытаний становятся более информативными, точными, и получаются быстро автоматическим способом.

Список литературы:

1. Gupta B. K., B. A. Lloyd, G. C. Stone, S. R. Campbell, D. K. Sharma, and N. E. Nilsson, "Turn Insulating Capability of Large AC Motors. Part I—Surge Monitoring" IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. EC-2, no. 4. Dec. 1987, pp. 658-665.
2. R. Tallam, T. G. Habetler, R. G. Harley, "Transient model for induction machines with stator winding turn faults" IEEE Transactions on Industry Applications, June 2002, 38(3):632 – 637.
3. Юдин, А.А. Импульсный тестер - прибор для диагностики состояния изоляции электродвигателей при ремонте и техническом обслуживании [Текст] / А.А. Юдин // Вектор высоких технологий №1(30) 2017;
4. Котеленец Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учеб.для вузов/ Н.Ф. Котеленец, Н.А. Акимова, М.В. Антонов - М.: издат. центр “Академия”., 2003. - 384 с.