

Комплексный подход к контролю состояния изоляции турбо и гидрогенераторов в режиме мониторинга

Одним из путей повышения надежности работы турбо и гидрогенераторов является использование систем непрерывного контроля состояния. Для этого широко применяются системы температурного, вибрационного, параметрического мониторинга. Эффективность использования этих систем подтверждена многолетним опытом их эксплуатации.

Все большее распространение в практике находят и другие системы мониторинга электрических машин, ранее применяющиеся менее часто. К таким можно отнести системы непрерывного контроля изоляции статора и ротора. Интенсивное развитие таких систем обусловлено созданием и совершенствованием новых методов контроля изоляции. В данной статье приведено описание защитного реле «MDR», предназначенного для комплексного контроля состояния изоляции турбо и гидрогенераторов, а также высоковольтных электродвигателей.

Система мониторинга «MDR» названа «реле» не потому, что реализуемые им диагностические функции просты, наоборот, по набору технических средств и встроенных диагностических алгоритмов, соответственно по эффективности своей работы, данная система мониторинга не имеет аналогов. Система названа реле потому, что встроенные диагностические алгоритмы представляют результаты работы мониторинга не в виде набора диагностических параметров, а в виде конкретных заключений, позволяющих обслуживающему персоналу оперативно принимать решения о возможности и сроках эксплуатации контролируемого оборудования.

Все встроенные в реле «MDR» подсистемы контроля изоляции можно разделить на четыре группы, в зависимости от контролируемого участка изоляции генератора. Это:

- Контроль изоляции обмотки статора генератора.
- Контроль изоляции обмотки ротора генератора.
- Контроль электромагнитной несимметрии электрической машины.
- Дополнительные подсистемы, косвенно оценивающие состояние изоляции.

Рассмотрим эти группы систем подробнее.

Контроль состояния изоляции обмотки статора электрической машины.

Для контроля состояния изоляции обмотки статора в реле «MDR» используется метод регистрации и анализа частичных разрядов. В настоящее время этот метод является наиболее часто применяемым на практике. К достоинствам этого метода следует отнести его высокую чувствительность и возможность выявления дефектов на самых ранних стадиях возникновения развития.

Основным недостатком метода контроля изоляции по уровню частичных разрядов является его высокая чувствительность к электромагнитным помехам, имеющим параметры, сопоставимые с импульсами частичных разрядов. Таких помех бывает достаточно много в питающем напряжении, или же они наводятся различными способами на обмотку статора. Эффективные методы борьбы со всеми этими помехами достаточно хорошо разработаны, по

их применение обычно приводит к существенному удорожанию систем измерения частичных разрядов в изоляции.

В зависимости от типа электрической мощности, ее габаритов и мощности, применяют различные схемы установки датчиков, предназначенных для измерения



частичных разрядов в изоляции обмотки статора. Самая простая схема установки четырех датчиков приведена на рисунке 1. Основную роль здесь играют специальные эпоксидно – слюдяные конденсаторы связи, обозначенные на схеме «С_{АВС}». Конденсаторы устанавливаются внутри корпуса статора электрической машины, и подключаются к клеммам обмотки. Эти

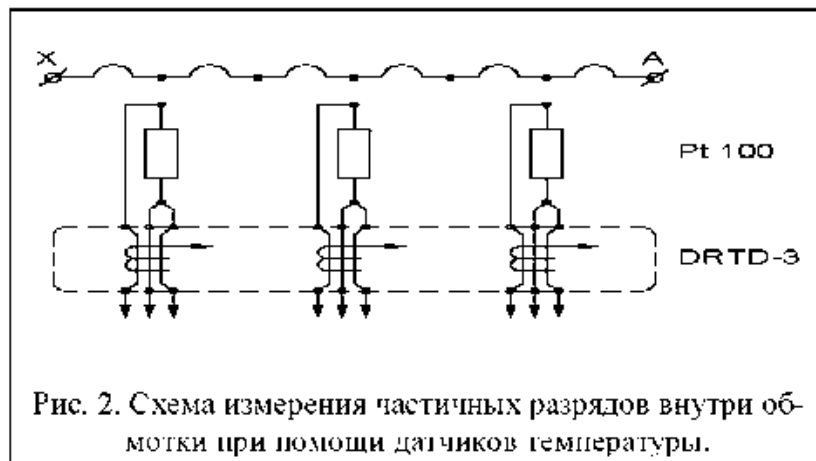
конденсаторы связи имеют емкость 80 пикофард, и предназначены для выделения высокочастотных импульсов ЧР из напряжения промышленной частоты.

При всей своей простоте данная схема в наибольшей степени подвержена влиянию помех, приходящих в статор по кабельной линии извне. Для отстройки измерительной схемы от таких помех в схеме используется дополнительный датчик - высокочастотный трансформатор тока «RFCT», монтируемый на заземляющем поводке высоковольтного кабеля. Включение в измерительную схему этого датчика позволяет реализовать эффективную систему фильтрации импульсов, называемую в литературе «time of arrival» - анализ времени прихода импульса к разным датчикам.

Принцип работы этой системы достаточно прост – если импульс возник внутри статора, например в фазе «А», то он сначала должен быть зарегистрирован конденсатором «С_А», а затем, через некоторое время, датчиком «RFCT». Временная задержка прихода импульса определяется расстоянием между датчиками, и может быть количественно оценена из соотношения, что один метр кабеля высокочастотный импульс «пролетает» за 5 – 6 наносекунд. Поскольку импульс из обмотки статора должен сначала попасть в кабель, замкнутый через его распределенную емкость, и только потом по внешней броне прийти к датчику «RFCT», временной сдвиг получается существенно больше. Временное разрешение технических средств в реле «MDR» равняется 3 – 5 нс, чего вполне достаточно для работы системы «time of arrival». При приходе импульса помехи из кабеля время прихода импульсов к датчикам меняется на противоположное, сначала приходит импульс с датчика «RFCT», а затем с конденсатора связи.

Большие сложности возникают при измерении частичных разрядов в обмотках статоров мощных турбо и гидрогенераторов. В крупных электрических машинах импульс, возникший внутри обмотки больших геометрических размеров, далеко от внешних зажимов, при помощи конденсаторов связи регистрируется очень ослабленным, или он даже вообще не будет выявлен. Это происходит потому, что стержни обмотки, относительно паза статора, представляют собой конденсатор достаточно большой емкости, в которой импульсы частичных разрядов быстро затухают. Чем дальше от входных зажимов обмотки возникает зона дефекта изоляции, тем в большей степени затухают импульсы ЧР.

По этой причине для корректного определения уровня частичных разрядов в обмотках статоров крупных электрических генераторов, использования одних конденсаторов связи недостаточно. Необходимо применять дополнительные датчики, смонтированные внутри обмотки. Это могут быть датчики поля, вклеенные под пазовый клин статора, или же в качестве дополнительных датчиков можно использовать датчики температуры, установленные в пазу между секциями обмотки. Если система контроля изоляции монтируется на новой электрической машине, то датчики поля могут быть заранее, по предварительной заявке, установлены в пазах статора на заводе – изготовителе. Если генератор уже находится в эксплуатации, то удобнее, в качестве антенн для регистрации импульсов частичных разрядов, лучше использовать датчики температуры.



На рисунке 2 показана такая измерительная схема, которая регистрирует импульсы частичных разрядов при помощи встроенных датчиков температуры типа Pt100. Для простоты на рисунке показана только одна фаза обмотки статора «А-Х», состоящая из 6 секций. Датчик частичных разрядов марки «DRTD-3» включается в разрыв проводов, идущих от Pt100 к приборам измерения температуры.

В реле «MDR» предусмотрено использование до трех датчиков марки «RFCT-3», по одному на каждую фазу обмотки статора, всего 9 каналов регистрации ЧР. В крупных электрических машинах количество датчиков температуры бывает значительно больше, поэтому для повышения достоверности измерений частичных разрядов можно выбрать их специальным образом, чтобы использовать термосопротивления, равномерно распределенные по окружности статора. В этом случае достигается максимальная чувствительность измерительной схемы.

Датчик «DRTD-3» необходимо монтировать непосредственно в клеммной коробке на генераторе. В этом случае затухание высокочастотных сигналов ЧР в проводах от датчиков, обычно мало приспособленных для этого, будет минимальным. Установка датчиков частичных разрядов не вносит искажений в измерение температуры обмотки, так как внутреннее сопротивление датчика «DRTD-3» практически равно нулю.

Каждый зарегистрированный импульс частичного разряда наиболее полно характеризуется четырьмя параметрами.

- Амплитуда импульса, которая может выражаться в единицах заряда (рК), амплитуды сигнала от датчика (mV), или энергии.
- Фазовый угол возникновения импульса, определяемый относительно синусоиды питающей сети.
- Частота первого пика импульса частичного разряда.
- Полная длительность импульса ЧР, включающая в себя все колебания, определяемая на уровне 5% от максимальной амплитуды.

На основании анализа такой информации в реле «MDR» рассчитывается общий уровень частичных разрядов в изоляции обмотки статора, их энергия и мощность. Стационарное измерение ЧР на работающем оборудовании дает возможность выявлять устойчивые тенденции в изменении этих параметров, оценивать скорость таких процессов. Встроенные алгоритмы диагностики позволяют автоматически определять тип имеющихся дефектов, их количество, интенсивность развития. Все это в совокупности позволяет

надежно контролировать техническое состояние изоляции обмотки статора, и, при необходимости, планировать сервисные и ремонтные работы.

Контроль изоляции обмотки ротора.

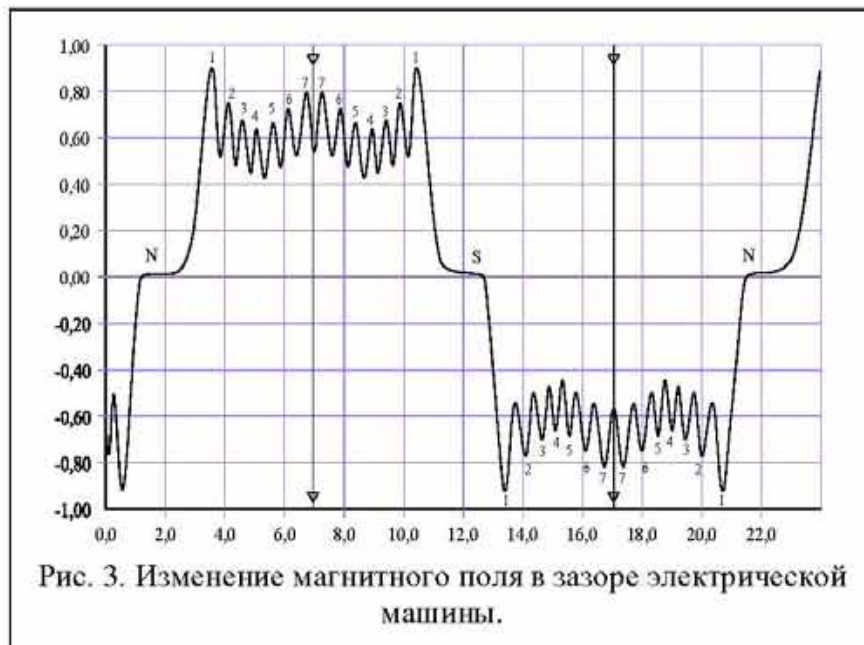
Основными дефектами изоляции обмотки возбуждения ротора синхронной электрической машины являются: наличие короткозамкнутых витков в обмотке, и снижение качества изоляции обмотки относительно стали ротора.

При появлении в обмотке возбуждения короткозамкнутых витков нарушается расчетное синусоидальное распределения магнитного поля в зазоре, значительно возрастает вибрация подшипников и пакета статора генератора с частотой, равной оборотной частоте. Попытки провести динамическую балансировку ротора генератора при помощи грузов не приводит к снижению вибрации во всех режимах работы. Это объясняется тем, что при различных нагрузках генератора величина электромагнитного дисбаланса, следовательно, и вес балансировочных грузов, имеют различное значение.

Определить наличие короткозамкнутых витков в обмотке ротора работающего генератора можно несколькими способами.

Во-первых, можно проанализировать спектральный состав напряжения на зажимах генератора в режиме холостого хода. Появление в напряжении нечетных гармоник частоты питающей сети, в основном третьей и пятой, если этого не было в предыдущих измерениях, может говорить о наличии в обмотке возбуждения короткозамкнутых витков. Нечетные гармоники должны проявиться во всех трех фазах обмотки одинаково.

Характерным признаком наличия короткозамкнутых витков в обмотке возбуждения можно считать прямую связь между уровнем вибрации подшипников и пакета статора и нагрузкой генератора. Интересным при этом является то, что с ростом нагрузки вибрация может как возрастать, так и уменьшаться, все будет зависеть от того, для какого режима работы генератора были установлены балансировочные грузы. Для того, чтобы при этом исключить влияние тепловых дисбалансов, контролировать изменение вибрации необходимо сразу же после изменения нагрузки, когда еще не произойдет изменение распределения температур внутри генератора.



Эффективным способом контроля наличия короткозамкнутых витков в обмотке возбуждения можно считать контроль электромагнитного поля в зазоре. Для этого используются простые индуктивные датчики, представляющие собой катушку небольшого размера, регистрирующую изменение магнитного потока в зазоре.

Как видно из рисунка, изменения магнитного поля, в основном, связаны с изменением полюсов обмотки

возбуждения. На эти изменения накладывается модуляция магнитного потока зубцовой структурой ротора. Появление искажения периодичности этих зубцов может говорить о наличии короткозамкнутых витков в обмотке возбуждения. Также можно «зеркально» сравнивать картины изменения поля в зазоре при прохождении разных полюсов ротора.

Все эти три метода оценки состояния изоляции обмотки возбуждения реализованы в реле «MDR». Поскольку все эти методы требуют тщательного анализа соотношения параметров, причем в различных режимах работы синхронной машины, то методы не доведены до уровня автоматизированного получения диагностических заключений, а требуют участия экспертов. Они предназначены для оперативного получения всей необходимой первичной информации, достаточной для принятия решения по изменению условий эксплуатации оборудования.

К реле «MDR» может быть подключена специальная приставка «MDW».

При помощи этой приставки, на основании анализа напряжения на обмотке возбуждения ротора, можно в режиме мониторинга контролировать величину сопротивления изоляции обмотки возбуждения относительно «бочки» ротора. При этом, дополнительно, происходит определение места ухудшения состояния изоляции обмотки. Данное значение определяется в процентном отношении, рассчитывается величина сопротивления обмотки до места дефекта, относительно общего сопротивления всей обмотки возбуждения ротора.

Если реле «MDR» устанавливается для контроля состояния изоляции высоковольтного асинхронного двигателя, то для контроля состояния короткозамкнутой клетки ротора используется метод анализа спектров тока, напряжения и мощности, потребляемых обмоткой статора.

Контроль электромагнитной несимметрии электрической машины.

Важным аспектом оценки технического состояния генератора является выявление наличия электромагнитной несимметрии. Такие несимметрии могут быть заложены в генератор на заводе-изготовителе, или же, что более важно, возникнуть в процессе эксплуатации оборудования. Наиболее частой причиной появления «приобретенной» несимметрии является возникновение короткозамкнутых контуров в пакете статора, обычно при нарушении изоляционного слоя между листами электротехнической стали.

Одним из способов контроля наличия электромагнитной несимметрии генераторов является измерение углов сдвига фазных напряжений. В режиме холостого хода производится синхронная регистрация векторов фазных ЭДС. Далее, с высокой точностью, до единиц угловых минут, производится расчет углов сдвига между векторами. Появление изменений в величинах взаимных углов может говорить о появлении в статоре или роторе электромагнитной несимметрии.

Для повышения достоверности диагностики этого параметра можно использовать величину вектора продольной ЭДС генератора. Величина этой ЭДС всегда будет связана с несимметрией векторов фазных напряжений. По этой причине все эти четыре вектора в реле «MDR» регистрируются синхронно, что способствует выявлению взаимных связей.

Если электрическая машина работает в режиме двигателя, то при помощи реле «MDR» наличие электромагнитной несимметрии контролируется на основании анализа спектров потребляемых тока и мощности. Появление в этих спектрах гармоник, кратных частоте воздействия электромагнитных сил, т. е. кратных частоте 100 герц, будет говорить о наличии возможных дефектов на пути протекания основного магнитного потока в электродвигателе.

Дополнительные методы контроля состояния электрической машины.

Важным параметром, позволяющим прогнозировать развитие состояния изоляционной системы генератора, является анализ вибрации стали в зоне лобовых частей обмотки статора. При ослаблении крепления лобовых частей секций обмотки, а также при увеличении подвижности секций обмотки в пазах, в вибрационном сигнале появляются высокочастотные составляющие. Основное количество этих гармоник располагается в зоне частот $1 \div 4$ килогерца. Точное положение этой полосы, и значения частот, зависят от конструктивных особенностей каждого конкретного генератора. Наличие явно выраженного тренда, показывающего увеличение мощности высокочастотных вибраций, говорит об

ухудшении качества креплений элементов обмотки в статоре. В этом случае внутренние диагностические алгоритмы реле «MDR» будут информировать эксплуатационный персонал о повышенном механическом износе изоляции обмотки статора.

Интересную информацию о состоянии генератора дают два емкостных датчика контроля величины воздушного зазора, которые входят в состав поставки реле «MDR». Датчики монтируются в зазоре генератора со сдвигом на 90 градусов, поэтому информация от них дает возможность построить прецессию ротора относительно статора. Такая информация бывает полезной для выявления некоторых механических проблем, связанных с состоянием ротором генератора, например, диагностировать трещины. Датчики контроля воздушного зазора более эффективны, чем используемые в настоящее время датчики «боя вала». Это объясняется тем, что они монтируются непосредственно в зазоре, тогда как датчики «боя вала» устанавливаются на валу ротора.

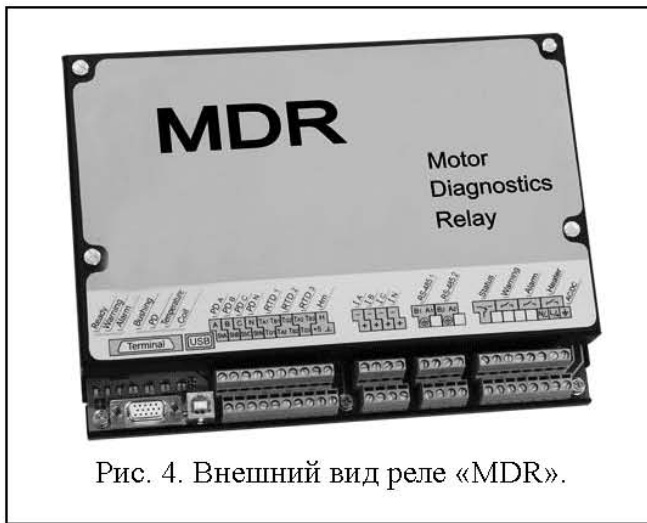


Рис. 4. Внешний вид реле «MDR».

ВЫВОДЫ:

1. Разработано и начато производство компактного (250 * 170 * 40 мм) микропроцессорного реле «MDR», рисунок 4. Реле позволяет в режиме мониторинга контролировать состояние изоляции турбо и гидрогенераторов, а также высоковольтных двигателей.

2. Защитное реле марки «MDR» позволяет контролировать состояние изоляции обмотки статора, в режиме мониторинга, на основании измерений и анализа частичных разрядов.

3. Состояние изоляции обмотки возбуждения ротора контролируется при помощи трех, взаимно дополняющих методов. Это: анализ магнитного поля в зазоре, контроль спектрального состава ЭДС обмотки статора, контроль вибрации пакета статора. Кроме того, реле позволяет непрерывно измерять сопротивления изоляции относительно ротора.