

*И. А. Смольянов, Н. Р. Сафин, В. А. Прахт,
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Прези-
дента
России Б. Н. Ельцина» (г. Екатеринбург, Россия)*

К ВОПРОСАМ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Мониторинг технического состояния асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым ротором является одним из важных показателей надежной и эффективной работы промышленных электроприводов. Как правило, основные эксплуатационные отказы АД происходят в двух узлах: в обмотке статора и в подшипниках. При этом соотношение между этими отказами зависит от типа, мощности и частоты вращения электродвигателя. Нарушение изоляции обмотки статора, в частности межвитковые и межфазные замыкания во многих случаях приводят к полному выходу из строя АД (рисунок) [1].



Рис. Пробой изоляции обмоток статора АД

Рассмотрим методы тестовой (оффлайн) и функциональной (онлайн) диагностики обмотки статора АД.

Методы тестовой диагностики являются наиболее простыми, и основным недостатком его перед функциональной диагностикой является необходимость отключения электрической машины от сети. Главными методами тестовой диагностики изоляции статора являются: импульсное испытание повышенным напряжением, тестирование частичными разрядами, проверка сопротивления изоляции, определение коэффициента абсорбции и т. д.

Принцип импульсного тестирования состоит в применении коротких импульсов напряжений к обмоткам статора. Если напряжение слишком велико, происходит пробой изоляции. Этот процесс может быть обнаружен путем наблюдений импульсных характеристик электродвигателя. Данный метод с приемлемой точностью определяет повреждения межвитковой изоляции обмотки статора. Отрицательным моментом применения импульсного тестирования является возможное ухудшение изоляции во время испытаний [2].

Тестирование высоким потенциалом напряжения на переменном токе регламентируется стандартами Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association 56 (IEEE-SA 56) и Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association 432 (IEEE-SA 432), в которых указывается практическое применение возможностей использования данной диагностики. Использование данного тестирования регламентируется на электрических машинах выше 10 кВА. Этот метод широко используется в исследованиях, направленных на определение уровня старения системы изоляции. Он больше подходит для лабораторных испытаний ввиду необходимости дорогого и крупногабаритного оборудования источника высоких напряжений.

Альтернативой в этом случае является тестирование на низкой частоте в пределах 0,1 Гц, что существенно снижает габариты приборов, используемых при испытаниях [3, 4].

Перейдем к методам функциональной диагностики. С промышленной точки зрения возможность мониторинга состояния изоляции АД без отключения его от питания сети, т. е. онлайн тестирование является предпочтительным. Данный подход должен обеспечить информацию о фактическом состоянии вращающейся машины с тем, чтобы по возможности оптимально планировать ремонтные работы. Мониторинг может основываться на определении ряда физических величин, таких как температура, мощность, ток статора.

Контроль за изменением температуры отдельных участков электродвигателя может быть использован для мониторинга состояния изоляции. Электродвигатели могут иметь автоматическую систему защит, которая получает сигналы от датчиков температуры. Датчики температуры могут располагаться в сердечниках и обмотках статора и в системах охлаждения. Авторы [5] отмечают, что контроль относительно малых отклонений величин температур дает возможность на ранней стадии избежать пробоя изоляции.

Диагностика по изменениям температур может определить ухудшение в изоляции фаза-земля и неисправности в межвитковой изоляции. Недостатками метода функциональной диагностики путем контроля температуры обмоток является необходимость учета сторонних воздействий окружающей среды, а также во многих случаях обязательное использование чувствительных датчиков температуры [2].

Определение межвитковой ёмкости даёт возможность оценивать старение изоляции. Авторы [2] предлагают подавать на обмотку статора небольшой высокочастотный сигнал, частота которого должна быть близка к частоте резонанса диагностируемой системы. Изменение фазового сдвига между подаваемым высокочастотным сигналом и измеряемым является индикатором изменения резонансной частоты для установления величины в межвитковой емкости, которая вызвана износом изоляции [2].

Авторы работы [6] применяют для диагностики изоляции двигателя с питанием от ПЧ спектральный анализ токов статора. При возникновении несимметрии обмотки статора, т. е. наличия межвитковых замыканий, в спектре тока возможны возникновения характерных гармонических составляющих, определяемых выражением [6]:

$$f = f_1 \left(\frac{n}{p} (1-s) \pm k \right), \quad (1)$$

где f_1 – частота питающей сети, Гц;

n – коэффициент, равный 1, 2, 3...;

s – скольжение;

k – коэффициент, равный 1, 3, 5...;

p – число пар полюсов.

При этом следует учитывать, что спектр тока АД, питаемого от ПЧ, имеет сложный состав. Кроме того, периодическое изменение нагрузочного момента на валу машины вызывает изменения спектрального состава токов статора, что обуславливает сложность проведения такой диагностики. Таким образом, спектральный анализ токов статора является приемлемым при диагностике машин, питаемых непосредственно от сети, с мало изменяющейся нагрузкой.

При питании АД от ПЧ возможно также использование модифицированного метода [7], при котором модулируемое с помощью ШИМ питающее напряжение основной частоты дополняется высокочастотной составляющей небольшой амплитуды. Данная высокочастотная составляющая напряжения мало влияет на режим работы АД. При этом высокочастотные составляющие токов, вызываемые вносимым высокочастотным напряжением также могут быть проанализированы с использованием

метода симметричных составляющих. Такой подход обладает следующими преимуществами: во-первых, импеданс обмоток АД для высокочастотных составляющих токов мало изменяется в зависимости от режима работы машины, что позволяет однозначно интерпретировать результаты диагностики для режимов работы с различным уровнем насыщения магнитопровода. Во-вторых, при использовании несущего сигнала напряжения высокой частоты снижается чувствительность метода к ошибкам из-за небаланса питающих напряжений. Для реализации этого метода диагностики к напряжению основной частоты 50 Гц, для ШИМ модулятора ПЧ (система импульсно-фазового управления), которое задаётся системой управления привода, добавляется дополнительное высокочастотное тестовое напряжение малой амплитуды. Частота сигнала может изменяться в диапазоне от 535 Гц [7] до 1500 Гц [8]. При обработке сигналов обратной связи по току осуществляется их фильтрация, в результате которой выделяется сигнал тока основной частоты и высокочастотный диагностический сигнал тока. Низкочастотный сигнал тока используется как сигнал обратной связи для формирования замкнутого контура управления током. Выделенный высокочастотный сигнал тока используется для диагностики межвитковых замыканий. Признаком наличия межвитковых замыканий является увеличение токов обратной последовательности [7].

Применение методики диагностирования с введением дополнительных высокочастотных составляющих малой амплитуды является перспективным, но требует проведения подробных исследований с целью определения влияния тестовых воздействий на режим работы АД.

Таким образом, анализ существующих методов тестовой и функциональной диагностики изоляции АД позволяет установить границы применения данных методов для инженеров на производстве. Превентивная диагностика АД позволяет сохранить нормированный эксплуатационный срок службы электрических машин, сократить потери времени и финансовые издержки, связанные устранением аварийных неполадок.

Список использованных источников

1. Aderiano M. da Silva. Induction motor fault diagnostic and monitoring methods // M. Sc. Thesis, Marquette University, Milwaukee, 2006. 159 P.
2. Stefan G., Jose M. A., Bin L., Thomas G. H. A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems // IEEE Transactions on Industrial Electronics 2008. Vol. 55. №. 12. P. 4130 – 4133.
3. Stone G. C. Recent important changes in IEEE motor and generator winding insulation diagnostic testing standards // IEEE Transactions on Industry Applications 2005. Vol. 41. №. 1. P. 91–100.
4. Stone G. C., Sedding H. G., Lloyd B. A., Gupta B. K. The ability of diagnostic tests to estimate the remaining life of stator insulation // IEEE Transactions on Energy Conversion 1988. Vol. 3 №. 4. P. 833 – 841.
5. Stone G. C. Advancements during the past quarter century in on-line monitoring of motor and generator winding insulation // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2002. Vol. 9. №. 5. P. 746 – 751.
6. Thomson W. T., Morrison D. On-line diagnosis of stator shorted turns in mains and inverter fed low voltage induction motors // International conference on power electronics, machines and drives, PEMD 2002: Conf. Publ. №. 487. P. 122 – 127.
7. Briz F., Degner M. W., Zamarron A., Guerrero J. M. On-line stator winding fault diagnosis in inverter - fed AC machines using high frequency signal injection // 37th IAS Annual Meeting: Conference Record of the industry applications conference. 2002. Vol. 3. P. 2094 – 2101.
8. Briz F., Degner M. W., Garcia P., Diez A. B. High-frequency carrier-signal voltage selection for stator winding fault diagnosis in inverter-fed AC machines // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55. №. 12. P. 4181 – 4190.