ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

АВТОРЫ:

Г.Б. ЛАЗАРЕВ,
К.Т.Н.,
ООО ИНЖЕНЕРНЫЙ
ЦЕНТР «ЭНЭЛ»

Ю.Н. САМОРОДОВ,
К.Т.Н.,
ООО «ЭЛЕКТРОСЕРВИС-
НТЦГ»

Являясь электроприводами мощных турбомеханизмов, асинхронные и синхронные электродвигатели (ЭД) среднего напряжения в процессе эксплуатации подвержены целому ряду воздействий, нередко приводящих к повреждению изоляции их статорных обмоток, активной стали, подшипников и т.д. Надежность и долговечность таких двигателей определяется режимами эксплуатации двигателей.

Ключевые слова: синхронные электродвигатели; асинхронные электродвигатели; обмотка статора; изоляция; повреждаемость; деградация изоляции; вакуумный выключатель; электромагнитные процессы; волновые процессы в обмотке статора; защита электродвигателей.

Электродвигатели среднего напряжения, являющиеся электроприводами мощных турбомеханизмов различного назначения, подвергаются в процессе эксплуатации различным воздействиям, нередко приводящим к повреждению изоляции их статорных обмоток, активной стали, подшипников и т.д.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации асинхронные и синхронные электродвигатели среднего напряжения, являющиеся электроприводом многочисленных мощных турбомеханизмов (насосов, вентиляторов, компрессоров и т.д.) на ТЭС, АЭС, компрессорных станциях магистральных газопроводов, нефтеперекачивающих станциях магистральных нефтепроводов, насосных станций водоканалов и т.п., подвергаются различным воздействиям, нередко приводящим к повреждениям изоляции их статорных обмоток, активной стали, подшипников из-за местных перегревов, термомеханики, повышенной вибрации и т.д. Такие ЭД эксплуатируются как в режимах с постоянной скоростью вращения при непосредственном присоединении к сети электроснабжения (изменение производительности технологических механизмов при этом осуществляется путем дросселирования рабочей среды — воды, воздуха, газов и т.п. различными механическими регуляторами), так и в режимах с переменной, регулируемой полупроводниковыми преобразователями частоты скоростью вращения в требуемом диапазоне изменения технологических параметров.

Надежность и долговечность ЭД среднего напряжения определяются вероятностными факторами, которые можно условно разделить на три группы. К первой группе относятся факторы, связанные с дефектами производства, зависящими от конструктивных и технологических особенностей ЭД и не зависящими от эксплуатационного и ремонтного персонала. Вторая группа — это факторы, связанные с режимами эксплуатации ЭД, оказывающими в ряде случаев существенное влияние на старение и деградацию изоляционной системы, износ подшипников и т.п. К третьей группе можно отнести факторы, целиком определяемые уровнем эксплуатации и качества проведения ремонтов ЭД.

Как известно, стоимость изоляции мощных трехфазных электродвигателей переменного тока, изготавливаемых на напряжение 6–15 кВ, лежит в диапазоне от 50% до 80% стоимости всех других материалов. Поэтому к изоляции статора предъявляют достаточно жесткие требования в части надежности и срока службы. Активные материалы — медь обмотки и сталь статора в таких ЭД работают в режиме больших удельных нагрузок, обусловленных высокими плотностями токов и индукции. Поэтому потери мощности в единице объема этих материалов получаются высокими, и для эффективного отвода выделяющегося тепла требуются большие перепады температур активных частей по отношению к температуре охлаждающей среды. Поскольку тепло от меди отводится через изоляцию, последняя должна обладать высокой теплопроводностью и выдерживать высокую температуру.

Основное требование, которое предъявляется к системе изоляции мощных ЭД среднего напряжения, заключается в том, что в пределах требуемого ресурса она должна противостоять эксплуатационным воздействиям.

Для выявления причин повреждения изоляции мощных ЭД среднего напряжения были проанализированы особенности электромагнитных и электрофизических процессов при электрических воздействиях, приводящих к деградации и последующим повреждениям их изоляции в эксплуатационных режимах работы с постоянной номинальной и регулируемой преобразователями частоты скоростью вращения.

В настоящей статье рассматриваются причины и характер электрических воздействий на изоляцию статора нерегулируемых ЭД среднего напряжения, приводится статистика повреждений ЭД, даны краткие сведения о материалах и конструкции изоляционной системы современных мощных синхронных и асинхронных ЭД. Обсуждаются результаты исследования на нефтеперекачивающих станциях электромагнитных процессов для выявления причин повреждения изоляции обмоток статора мощных синхронных ЭД на их присоединениях вакуумными выключателями к сети электроснабжения 10 кВ, рассмотрены схемы и способы защиты изоляции ЭД.

В продолжение затронутых вопросов в следующей статье будут рассмотрены проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) мощных ЭД среднего напряжения, регулируемых преобразователями частоты, показана зависимость электрических воздействий на изоляцию статора ЭД от топологии преобразователей с изменяемой выходной частотой, исследованы причины возникновения синфазных гармоник, подшипниковых токов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ИЗОЛЯЦИОННУЮ СИСТЕМУ ЭД СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

Как показывают многочисленные исследования и практика эксплу-

атации, изоляция вращающихся машин, с точки зрения электрической прочности, является их наиболее слабым элементом. Хотя срок службы корпусной и витковой изоляции обмоток статоров ЭД 6–10 кВ составляет в среднем 20–25 лет, из анализа статистики повреждений ЭД следует, что в процессе эксплуатации происходит довольно интенсивный износ изоляции статора, связанный как с производственными дефектами, так и с электрическими воздействиями, оказывающими существенное влияние на ее деградацию, вследствие чего срок службы изоляции может значительно сократиться [1–11].

Изоляция мощных асинхронных и синхронных машин работает в условиях постоянной вибрации. При этом она периодически подвергается значительным ударным электродинамическим воздействиям, возникающим при прохождении по обмотке статора пяти-семикратных токов в режимах прямых пусков, при торможении, набросах и сбросах нагрузки ЭД, вследствие чего на участках выхода обмотки из пазов возникают наиболее опасные для изоляции механические напряжения, нередко приводящие к образованию микротрещин.

Негативно сказывается на ресурсе изоляционной системы ЭД неравномерный и повышенный нагрев отдельных частей обмотки и сердечника статора в переходных режимах, к тому же сопровождающийся механическими воздействиями на изоляцию и приводящий к ее деформации и ускоренному старению. Так, в работе [1] на основе значительного объема статистических данных из различных источников (информация по повреждениям ЭД проанализирована по более чем 80 публикациям за 26 лет) отмечается, что при эксплуатации высоковольтных асинхронных двигателей мощностью 200 л. с. и выше 37% отказов от их общего числа возникают из-за повреждений изоляции обмотки статора, 40% приходится на повреждение подшипников, 10% отказов связаны с повреждениями ротора и 13% — с остальными причинами повреждений.

Согласно статистическим исследованиям, выполненным в США и Канаде [2], более 37% отказов генераторов и электродвигателей с воздушным охлаждением и до 56% отказов гидрогенераторов связаны с проблемами электрической изоляции статоров этих машин, которые большей частью обусловлены развитием в них частичных разрядов различных типов и интенсивности.

В работах [5, 6] анализируется статистика повреждений за период с 1985 г. по 2007 г. синхронных двигателей СТД-12500 (12 500 кВт, 10 кВ) с изоляционной системой статора «Монолит-2» и классом нагревостойкости В, эксплуатирующихся на компрессорных станциях «Трансгаз Нижний Новгород» с постоянной (номинальной) скоростью вращения в составе электроприводных газоперекачивающих агрегатов. За указанный период вследствие повреждения изоляции обмотки статора зафиксирован выход из строя 62 электродвигателей СТД. При этом 86% повреждений произошло в пазовой части обмотки статора, 11% — в лобовой части обмотки и 3% — на выводах.

В работе [7] приводятся данные по статистике повреждений и анализу характера отказов асинхронных двигателей, используемых в собственных нуждах ТЭС, в соответствии с которыми их повреждения распределены следующим образом: изоляция обмотки статора — 50%, вывода — 12%, обмотка ротора — 10%, подшипники — 11%, система охлаждения ротора и статора — 7%, активная сталь, вал — 10%. Там же указывается, что основные причины повреждений связаны с заводскими производственными дефектами — 44%, общим низким уровнем эксплуатации — 16%, недостатками организации ремонта и невысоким качеством его проведения — 10%.

В работе [8] отмечается, что достаточно часто импульсная электрическая прочность витковой изоляции после укладки катушек в пазы статора снижается в среднем на 20%. На рис. 1 приведена статистика распределения повреждений в различных частях обмотки статора электродвигателей среднего напряжения по данным одного из заводов-изготовителей [8].

Наибольшим воздействиям подвергается изоляция обмотки статора в переходных режимах и прежде всего при пуске ЭД. При этом наряду с усилиями, действующими на стержни обмотки в радиальном направлении и вызывающими мощное сжатие корпусной изоляции, в пазовой части действуют также тангенциальные пульсирующие усилия, прижимающие стержни к стенке паза. Поэтому при сборке ЭД необходимо расклинивать обмотку статора в пазах так, чтобы исключить даже самое незначительное смещение стержней. Должны быть исключены нарушения в установке концевых клиньев в пазах статора, смещения межпакетных распорок в вентиляционных каналах, смещения нажимных пальцев, наличие посторонних предметов в лобовых частях и т.п. [6]. Распределение повреждений витковой изоляции по частям статорной обмотки показано на рис. 2 [8], из которого видно, что повреждения витковой изоляции (примерно 80%) происходят в режимах прямого пуска электродвигателей.

Значительный объем повреждений ЭД (до 45–55%) на нефтеперекачивающих станциях магистральных нефтепроводов связан с ускорен-

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПО ЧАСТЯМ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

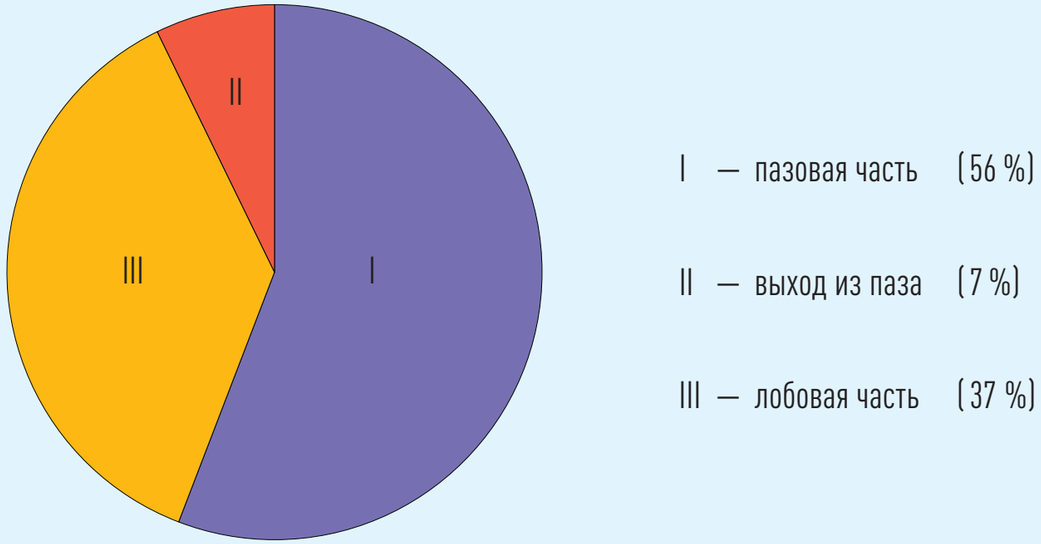


Рис. 1

ным износом изоляции их статоров вследствие циклического режима работы перекачивающих насосов [10, 11]. Как показывают многочисленные исследования и практика эксплуатации, на присоединениях ЭД к сети электроснабжения вакуумными выключателями электромагнитные процессы при их включении и отключении из-за неодновременности замыкания и размыкания контактов сопровождаются возникновением перенапряжений и волновых процессов, негативно воздействующих на витковую изоляцию обмотки статора, что приводит к ее ускоренной деградации и последующему повреждению [5, 6, 8, 9, 12, 13]. Частоты волновых процессов в системе «выключатель — соединительный кабель — ЭД», определяемые параметрами выключателя (его током среза), кабеля и его длиной, а также параметрами ЭД, достигают 75–150 кГц. Перенапряжения значительной амплитуды и волновые процессы могут вызывать коронирование обмоток, скользящие электрические разряды и ионизацию как воздушных включений внутри изоляции, так и воздуха между активной сталью и поверхностью изоляционной системы статора из-за воздушного зазора между ними [9]. При этом, поскольку в системах изоляции статоров современных ЭД их емкостное сопротивление низкое, такие процессы часто сопровождаются ионизацией воздушных включений, что может иногда приводить к возникновению в них искровых разрядов емкостного тока, порой переходящих в дуговые разряды, образованию озона, увеличению тепловых потерь в изоляции и повышению температуры обмотки статора. Все это интенсифицирует процессы ускоренного старения витковой и корпусной изоляции [2, 4, 8, 9, 12, 13].

Применение двухзвенных полупроводниковых преобразователей с изменяемой выходной частотой (ПЧ), содержащих выпрямитель и инвертор, для регулирования скорости вращения ЭД вносит свои особенности в проблему электрических воздействий на изоляцию статора, а также токов через подшипники [14–16]. Возможность осуществления плавного частотного пуска ЭД с током, близким к его номинальному току, практически исключает электродинамические воздействия на лобовые части обмотки статора, значительно снижая степень износа изоляции, особенно при частых пусках мощных технологических механизмов. В то же время коммутация в инверторе ПЧ сопровождается генерированием высших гармоник,

ЧИСЛО ПОВРЕЖДЕНИЙ (N) ВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НОМЕРА КАТУШКИ ОБМОТКИ СТАТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

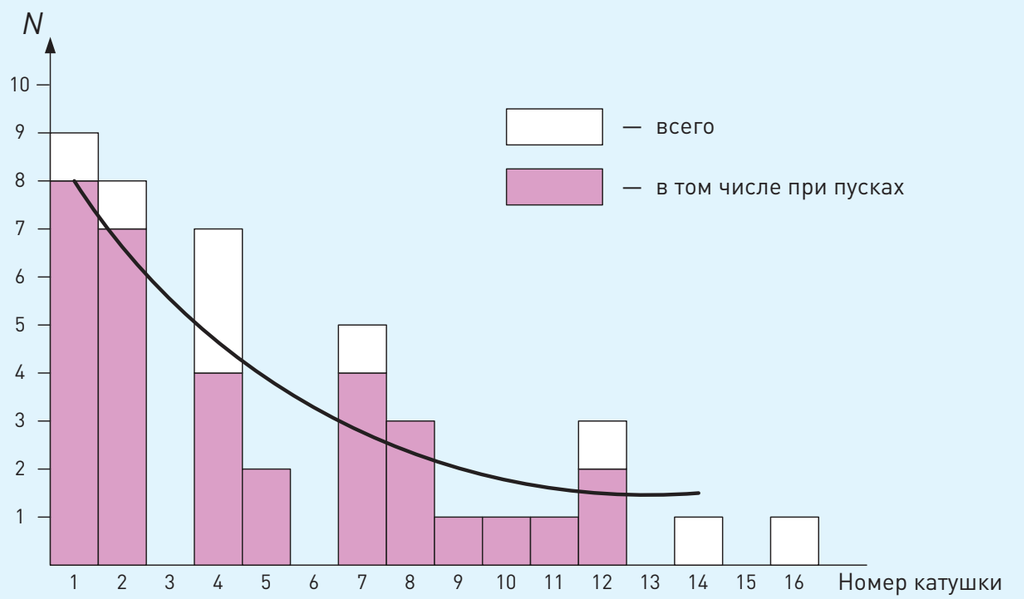


Рис. 2

искажающих формы напряжения и тока ЭД и обусловливающих дополнительные потери, которые увеличивают нагрев ЭД и снижают его мощность. Спектр генерируемых гармоник определяется главным образом топологией инвертора и алгоритмами модуляции [18–20]. Величина потерь в зависимости от топологии автономного инвертора и частоты импульсов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) может достигать 2–3% номинальной мощности ЭД [21]. При регулировании ЭД от ПЧ на интервалах коммутации могут возникать перенапряжения, воздействующие на основную и витковую изоляцию обмотки статора.

В случае регулирования ЭД от инвертора тока на полностью управляемых симметричных тиристорах (GTO, SGCT) на выходе инвертора формируются ток и напряжение, близкие по форме к синусоидальной, основная гармоника которых может практически достигать 100%. При этом форма напряжения статора достаточно гладкая и не содержит пиков коммутационных перенапряжений [18–20]. Поэтому, как показала практика применения ПЧ с ШИМ-инверторами тока на полностью управляемых тиристорах, такие преобразователи обычно не приводят к ускоренной деградации изоляции, и их можно без ограничений сопрягать со стандартными общепромышленными ЭД [16, 21, 22]. Применение инверторов тока позволяет также не накладывать ограничений на длину соединительного кабеля между ПЧ и электродвигателем.

Иначе обстоит дело при применении ПЧ с ШИМ-инверторами напряжения на асимметричных IGCT-тиристорах или силовых биполярных транзисторах IGBT. Выходное напряжение (напряжение на обмотке статора) у таких инверторов — ступенчатой формы в виде последовательности высокочастотных импульсов различной полярности и длительности с высокой крутизной фронта (dU/dt) [18–20]. Последняя определяется временем переключения силовых полупроводниковых приборов–«ключей» в инверторе при коммутации. Это время, например, для IGBT и IGCT лежит в пределах 0,05–2 мкс. Очевидно, что периодически прикладываемые к статору ЭД волны импульсного напряжения, воздействуя на межвитковую

изоляцию, ускоряют износ и могут приводить к ее преждевременному повреждению. При этом наибольшим воздействиям подвергаются первые и последние витки катушек любой фазы обмотки статора, что приводит к постепенному уменьшению электрической прочности межвитковой изоляции [14, 15, 22]. В зависимости от времени нарастания (крутизны) импульсов в напряжении ШИМ-инвертора напряжения, длины соединительного кабеля и полного сопротивления ЭД амплитуды перенапряжений, возникающих вследствие волновых процессов в цепи «кабель на выходе ПЧ — обмотка статора ЭД», могут достигать примерно двукратных значений относительно линейного напряжения, что без принятия специальных мер накладывает ограничения на длину соединительного кабеля (так называемая проблема «длинного кабеля») [15, 23].

Поскольку трехфазное напряжение на выходе преобразователя частоты, в отличие от синусоидального напряжения, не сбалансировано (в зависимости от топологии преобразователя сумма векторов мгновенных напряжений трех фаз на его выходе не равна нулю), то процессы коммутации в двухзвенных ПЧ сопровождаются генерированием синфазных гармоник. Гармоники ввиду высокой добротности электрооборудования преобразователя и двигателя приводят к возникновению высокочастотных перенапряжений на изоляции статора относительно земли, что особенно опасно для изоляции нейтрали ЭД, и появлению подшипниковых токов [17, 25–27]. При этом в соответствии с работами [17, 26] под синфазным напряжением/током (common mode voltage/current) понимают среднее арифметическое фазных напряжений/токов относительно земли. Из-за несбалансированной формы и высокочастотных импульсов в напряжении, подаваемом на двигатель, на его вал наводится ЭДС, которая при величине, достаточной, чтобы пробить изолирующий слой смазки, приводит к циркуляции тока вдоль пути, образованного ротором, валом и подшипниками на землю. Из-за чрезмерного тока и электрических разрядов в подшипниках возникает язвенная коррозия [17].

ОСОБЕННОСТИ ИЗОЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОБМОТОК СТАТОРА МОЩНЫХ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В связи с жесткими требованиями к электрической и механической прочности, а также к нагревостойкости, главная изоляция современных крупных асинхронных и синхронных двигателей отечественного и зарубежного производства выполняется на основе применения слюдяных изоляционных материалов, преимущественно в виде стеклослюдинитовых лент, поскольку такая изоляция относится к классу нагревостойкости с допустимой температурой не более 180 °C [4, 28].

Стеклослюдинитовая лента наматывается с перекрытием в несколько слоев на медные токоведущие части стержней обмотки статора, пропитывается под вакуумом связующим составом и опрессовывается. Технология, применяемая разными изготовителями ЭД, выбирается таким образом, чтобы обеспечить высокую прочность и монолитность изоляции в целом, так как, несмотря на высокую короностойкость самой слюды, частичные разряды в газовых (воздушных) включениях, воздействуя на связующие материалы, ограничивают срок службы изоляции. Кроме того, газовые прослойки сильно снижают механическую прочность и теплопроводность изоляции. В термореактивной изоляции, преимущественно применяемой в настоящее время производителями современных мощных электрических машин переменного тока, в качестве пропиточных составов используются пропиточные компаунды на основе эпоксидных и полиэфирных смол. Такой состав после полимеризации не размягчается при нагреве. В качестве подложки, как правило, используют стеклоткань. По сравнению с компаундированной изоляцией термореактивная изоляция в нагретом состоянии имеет в 1,5–2 раза более высокую электрическую прочность, в 4–5 раз большую прочность на разрыв и в 3–4 раза меньшие диэлектрические потери. Однако она более хрупкая.

В настоящее время стеклослюдинитовые ленты, применяемые в качестве диэлектрического барьера, выпускаются двух типов: предварительно пропитанные и непропитанные. Ленты, имеющие долю связующего вещества в пределах 35–40%, относят к классу предварительно пропитанных, а имеющие 5–11% — к классу непропитанных. В России из предварительно пропитанных лент изготовляют изоляцию типа слюдотерм и монотерм. За рубежом подобная технология называется Resin-Rich (RR-технология). После намотки предварительно пропитанной ленты на токоведущую часть стержня осуществляется ее опрессовка и отверждение под давлением при температуре 160 °C. Технология с предварительно пропитанными лентами применяется рядом электромашиностроительных

заводов при изготовлении турбогенераторов, ЭД большой мощности, тяговых электродвигателей, а также предприятиями, занимающимися ремонтом электродвигателей. Одним из преимуществ RR-технологии является полная ремонтопригодность обмоток статоров электрических машин.

При изготовлении изоляционных систем крупных машин переменного тока среднего напряжения как отечественные, так и зарубежные производители применяют технологию вакуумно-нагнетательной пропитки Vacuum Pressure Impregnation (VPI) [4, 28]. Например, одна из крупных электромашиностроительных фирм ФРГ VEM Sachsenwerke при производстве синхронных машин мощностью до 35 000 кВт напряжением 6–15 кВ и асинхронных машин мощностью до 28 000 кВт напряжением 6–11 кВ применяет стандартную для всех изоляционную систему VEMoDUR-VPI-155 собственной разработки [29, 30]. Для витковой изоляции статоров указанных машин применяют листовую слюдяную ленту, для главной изоляции (пазовая и лобовая часть) — стеклослюдяные ленты с низким содержанием связующего. Состав для пропитки — эпоксидная смола. Статоры с вложенными шаблонными катушками вплоть до диаметра 4500 мм полностью пропитываются по методу VPI. Для предотвращения коронных разрядов в пазовой части обмотки наносят низкоомное покрытие для защиты от тлеющего разряда, а на выходе паза — высокоомное покрытие. Для обмотки статора ЭД очень больших мощностей (диаметром свыше 4500 мм) VEM применяет изготовленные по технологии Resin-Rich шаблонные катушки, у которых главная изоляция и изоляция лобовой части обмотки выполнена из содержащих большую долю смолы стеклослюдяных лент.

КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ СТАТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ H-MODIN 1DX

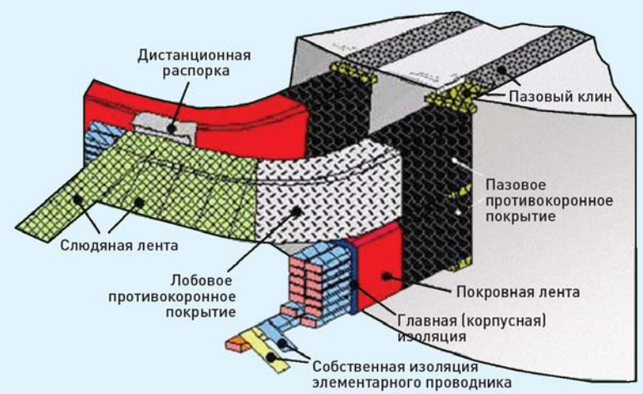


Рис. 3

Для предотвращения коронного разряда в пазовой части наносится низкоомное, а на выходе паза — высокоомное покрытие.

Схожее решение по изоляции статоров асинхронных двигателей мощностью до 10 000 кВт применяет и другая немецкая фирма LDW, разработавшая стандартную для всех выпускаемых фирмой мощных ЭД изоляционную систему Epitherm-2 [31].

В обмотках статоров асинхронных ЭД фирмы Siemens серий H-modul напряжением 3–13,8 кВ, мощностью до 14 000 кВт, получивших в последние годы широкое применение в РФ для привода насосов насосно-перекачивающих станций магистральных нефтепроводов ВСТО-1 и ВСТО-2, а также синхронных ЭД серии H-modin типа 1DX мощностью 6300 и 8000 кВт, напряжением 10 кВ применена запатентованная фирмой Siemens термореактивная изоляция MICALASTIC, также изготавливаемая по технологии VPI. Ее основной диэлектрический барьер — слюда, связующее — полиэфирный компаунд, класс нагревостойкости — F. Конструкция системы изоляции мощных синхронных ЭД серии H-modin 1DX напряжением 6 и 10 кВ, производимых фирмой Siemens, показана на рис. 3 [32].

Отечественные производители мощных асинхронных и синхронных ЭД на напряжение 6 и 10 кВ, такие как «Русэлпром — Сафоновский электромашиностроительный завод», НПО «ЭЛСИБ», «Электротяжмаш-Привод» и др., при конструировании изоляционных систем статоров также применяют современные технологии. Так, для обмотки статоров используют медные нагревостойкие провода с двухслойной изоляцией из стеклонитей и пропиткой глифталевым лаком, обеспечивающие пробивное напряжение изоляции элементарного проводника не менее 550 В [8]. Для усиления витковой изоляции дополнительно вполнахлеста наматывается слой стеклослюдинитовой ленты. Число слоев витковой

изоляции зависит от номинального напряжения ЭД и его мощности. Несмотря на то что эта изоляция имеет достаточно высокую электрическую прочность, в процессе производства ЭД при изготовлении катушек и укладки их в пазы статоров достаточно часто образуются местные дефекты изоляции: ослабление изоляции между витками в результате попадания металлических частичек, изменение изоляционных промежутков между витками в лобовых и пазовых частях катушек в результате взаимного смещения проводников при операциях формовки катушек на рихтовочном шаблоне и укладке их в пазы статоров, ослабление междувитковой изоляции вследствие ее механического повреждения.

Изоляционная система обмоток статоров ЭД отечественных производителей изготавливается преимущественно по технологии монолит-2, т.е. способом вакуум-нагнетательной пропитки с использованием различных компаундов, имеющих малую усадку при затвердении [28, 33, 34]. Как показывает практика, из-за наличия небольшого количества технологического связующего в непропитанной ленте слюдяная бумага может легко повреждаться при изолировочных работах. Поэтому сохранение целостности слюдяного барьера при изготовлении изоляции является важной составной частью технологии монолит-2.

Изоляцию типа монолит-2 широко применяют для катушечных обмоток электродвигателей среднего напряжения. При этом используют сухие стеклослюдинитовые ленты, накладываемые в несколько слоев на пазовую и лобовые части. После укладывания катушек в пазы обмотанный сердечник пропитывают в эпоксидном компаунде. Перед пропиткой в котле выполняют вакуумирование в течение нескольких часов, затем подают разогретый компаунд и повышают давление до 0,8 МПа. На некоторых заводах при изготовлении крупных электродвигателей (при диаметре сердечника более 1,5 м) катушки пропитывают в эпоксидном компаунде вышеуказанным способом до укладки в статор. Затем готовые катушки укладывают в статор и запекают.

Применение новых изоляционных материалов и современной технологии, направленных на совершенствование изоляционных систем статоров мощных электрических машин, повышает в целом их надежность. Однако, как показывает практика, полностью исключить неблагоприятные для изоляции статора электрические воздействия в эксплуатационных режимах мощных ЭД без ее защиты не удается.

Ниже в качестве конкретного примера приведены результаты исследования причин повреждения изоляции обмотки статора синхронных ЭД мощностью 6300 кВт и 8000 кВт напряжением 10 кВ, изготовленных фирмой Siemens для привода нефтеперекачивающих насосов на насосно-перекачивающих станциях (НПС) «Дальнефтепровод» (ВСТО-2).

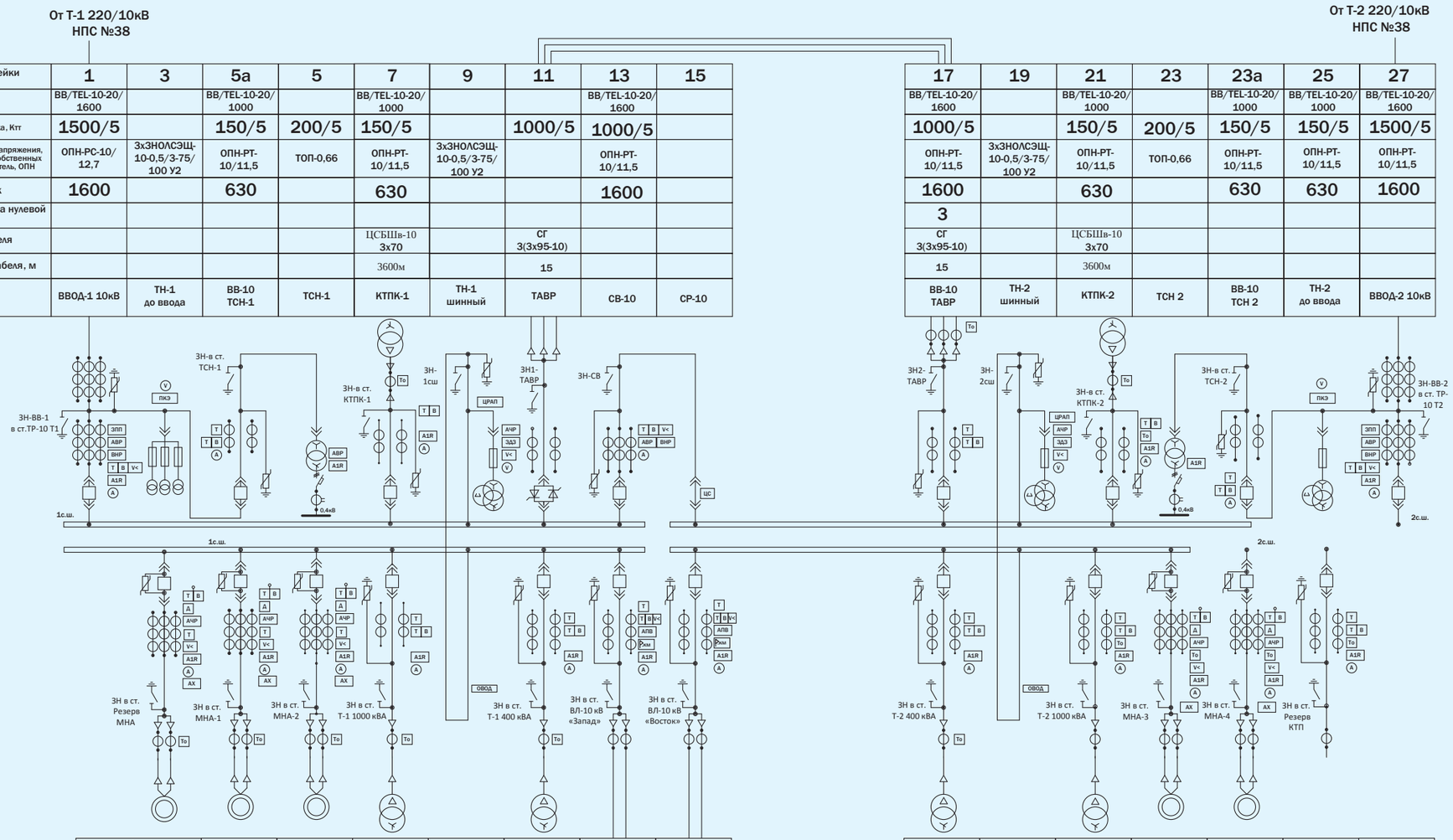
ОСОБЕННОСТИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Параметры	Условный номер ЭД		
	№ 1 НПС-38	№ 2 НПС-30	№ 3 НПС-34
Мощность ЭД, МВт	6,3	8,0	6,3
Номинальное напряжение, кВ	10	10	10
Толщина корпусной изоляции, мм	2,0	2,0	2,0
Наработка от момента ввода, ч	1491	2239	7064
Число пусков	82	133	211
Возникновение виткового замыкания	Да	Нет	Нет
Причина отключения ЭД	Пробой изоляции на землю с переходом в междуфазное КЗ. Работа дифзащиты	Перемежающийся характер пробоя изоляции на землю. Работа ТЗНП	Перемежающийся характер пробоя изоляции на землю. Работа ТЗНП и дифзащиты
Зона пробоя	В 1-м вентиляционном канале статора	Край паза статора	Край паза статора
Характер пробоя	Пробой между верхней и нижней полукатушками в одном пазу	Пробой верхней полукатушки на активную сталь	Пробой между верхней и нижней полукатушками в одном пазу
Рабочий потенциал точек пробоя	1-я полукатушка — 0 В; 2-я полукатушка — 5780 В	285 В	1-я полукатушка — 0 В; 2-я полукатушка — 5780 В
Схема соединения фаз	Звезда	Звезда	Звезда
Режим работы нейтрали	Нейтраль изолирована	Нейтраль изолирована	Нейтраль изолирована

Таблица 1

ЭНЕРГИЯ
ЕДИНОЙ СЕТИ №6 (29)
ДЕКАБРЬ 2016 — ЯНВАРЬ 2017

ОДНОЛИНЕЙНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЗРУ-10 КВ НПС-38



Номер ячейки/тип ячейки	1	3	5а	5	7	9	11	13	15
Тип оборудования: Тип выключателя	ВВ/TEL-10-20/1600		ВВ/TEL-10-20/1000		ВВ/TEL-10-20/1000			ВВ/TEL-10-20/1600	
Тип оборудования: Трансформатор тока, Ктт	1500/5		150/5	200/5	150/5		1000/5	1000/5	
Тип оборудования: Трансформатор напряжения, трансформатор собственных нужд, предохранитель, ОПН	ОПН-РС-10/12,7	3хЗНОЛСЭЩ-10-0,5/3-75/100 У2	ОПН-РТ-10/11,5	ТОП-0,66	ОПН-РТ-10/11,5	3хЗНОЛСЭЩ-10-0,5/3-75/100 У2		ОПН-РТ-10/11,5	
Номинальный ток	1600		630		630			1600	
Количество тр-ров тока нулевой последовательности									
Марка и сечение кабеля					ЦСБШв-10 3х70		СГ 3(3х95-10)		
Длина и количество кабеля, м					3600м		15		
Назначение ячейки	ВВОД-1 10кВ	ТН-1 до ввода	ВВ-10 ТСН-1	ТСН-1	КТПК-1	ТН-1 шинный	ТАВР	СВ-10	СР-10

Номер ячейки/тип ячейки	17	19	21	23	23а	25	27
Тип оборудования: Тип выключателя	ВВ/TEL-10-20/1600		ВВ/TEL-10-20/1000		ВВ/TEL-10-20/1000	ВВ/TEL-10-20/1000	ВВ/TEL-10-20/1600
Тип оборудования: Трансформатор тока, Ктт	1000/5		150/5	200/5	150/5	150/5	1500/5
Тип оборудования: Трансформатор напряжения, трансформатор собственных нужд, предохранитель, ОПН	ОПН-РТ-10/11,5	3хЗНОЛСЭЩ-10-0,5/3-75/100 У2	ОПН-РТ-10/11,5	ТОП-0,66	ОПН-РТ-10/11,5	ОПН-РТ-10/11,5	ОПН-РТ-10/11,5
Номинальный ток	1600		630		630	630	1600
Количество тр-ров тока нулевой последовательности	3						
Марка и сечение кабеля	СГ 3(3х95-10)		ЦСБШв-10 3х70				
Длина и количество кабеля, м	15		3600м				
Назначение ячейки	ВВ-10 ТАВР	ТН-2 шинный	КТПК-2	ТСН 2	ВВ-10 ТСН 2	ТН-2 до ввода	ВВОД-2 10кВ

Номер ячейки/тип ячейки	2	4	6	8	10	12	14
Тип оборудования: Тип выключателя	ВВ/TEL-10-20/1000	ВВ/TEL-10-20/1000	ВВ/TEL-10-20/1000	ВВ/TEL-10-20/1000		ВВ/TEL-10-20/1000	ВВ/TEL-10-20/1000
Тип оборудования: Трансформатор тока, Ктт	600/5	600/5	600/5	150/5		150/5	150/5
Тип оборудования: Трансформатор напряжения, тсн, предохранитель, ОПН	ОПН-КР-10/10,5	ОПН-КР-10/10,5	ОПН-КР-10/10,5	ОПН-РТ-10/11,5		ОПН-РТ-10/11,5	ОПН-РТ-10/11,5
Номинальный ток	630	630	630	630		630	630
Количество тр-ров тока нулевой послед.	2	2	2	1		1	2
Марка и сечение кабеля		СБГ-10 2(3х95)	СБГ-10 2(3х95)	СГ 3х95-10		СБГ-10 3х95	СБШв-10 2х(3х95)
Длина и количество кабеля, м		135	130	45		440	470м
Назначение ячейки	Резерв-МНА	МНА-1	МНА-2	Т1-1000кВА	Шинная перемычка	Т1-400кВА	ВЛ-10кВ «Запад»

Номер ячейки/тип ячейки	16	18	20	22	24	26	28
Тип оборудования: Тип выключателя	ВВ/TEL-10-20/1000	ВВ/TEL-10-20/1000		ВВ/TEL-10-20/1000	ВВ/TEL-10-20/1000	ВВ/TEL-10-20/1000	ВВ/TEL-10-20/1000
Тип оборудования: Трансформатор тока, Ктт	150/5	150/5		150/5	600/5	600/5	150/5
Тип оборудования: Трансформатор напряжения, тсн, предохранитель, ОПН	ОПН-РТ-10/11,5	ОПН-РТ-10/11,5		ОПН-РТ-10/11,5	ОПН-КР-10/10,5	ОПН-КР-10/10,5	ОПН-РТ-10/11,5
Номинальный ток	630	630		630	630	630	630
Количество тр-ров тока нулевой послед.	2	1		1	2	2	1
Марка и сечение кабеля	СБШв-10 2х(3х95)	СБГ-10 3х95		СГ 3х95-10	СБГ-10 2(3х95)	СБГ-10 2(3х95)	
Длина и количество кабеля, м	430м	440		40	135	150	
Назначение ячейки	ВЛ-10кВ «Восток»	Т2-400кВА	Шинная перемычка	Т2-1000кВА	МНА-3	МНА-4	Резерв-КТП

Условные обозначения

- АХ - Защита от асинхронного хода
- Т - Токовая отсечка
- ТВ - Максимальная токовая защита с выдержкой времени
- ЦС - Центральная сигнализация
- ЗДЗ - Дуговая защита
- Ⓐ - Амперметр
- Ⓥ - Вольтметр
- Р.КМ - Многофункциональный счетчик электроэнергии
- ОВОД - Оптоволоконная дуговая защита
- ЦРАП - Цифровой регистратор аварийных процессов
- ИПКЭ - Измеритель показателей качества электроэнергии
- ТВV< - Максимальная токовая защита с комбинированным пуском
- Т̊В - Защита от перегрузки с действием на отключение или сигнал
- То - Защита от замыканий на землю с действием на отключение
- Δ - Дифференциальная защита
- V< - Защита минимального напряжения
- АЧРI, АЧРII - Защита автоматической разгрузки по частоте I и II очереди
- АЧР - Защита АЧР в шкафах электродвигателей
- ЗПП - Защита от потери питания
- АПВ - Автоматическое повторное включение
- АВР - Автоматическое включение резерва
- А1R - Устройство для определения расстояния до места повреждения ВЛ

Рис. 4

НАТУРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ КОММУТАЦИИ СИНХРОННЫХ ЭД ВАКУУМНЫМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ

На ряде НПС «Дальнефтепровод» ВСТО-2 для электропривода магистральных насосных агрегатов (МНА) используются 20 синхронных ЭД серии H-modin 1DX производства заводов Dynamowerke (Берлин) и «Сименс-Электропривод». Все эксплуатируемые ЭД изготовлены, как отмечалось выше, с применением для обмотки статора термореактивной изоляции MICALASTIC на основе вакуумнагнетательной пропитки.

Электроснабжение каждой НПС обеспечивает подстанция, в состав которой входят два системообразующих трансформатора мощностью 25 000 кВА каждый, напряжением 220/10 кВ. Напряжения 10 кВ каждого трансформатора через соответствующие вводы подключены к секциям закрытого распределительного устройства ЗРУ-10 кВ. ЭД присоединены к шинам 10 кВ системы электроснабжения вакуумными выключателями BB/TEL-10-20/1000 «Таврида-Электрик», параллельно контактам которых для защиты от коммутационных перенапряжений установлены ОПН этой же фирмы. Электроснабжение НПС выполнено по практически идентичным схемам. На рис. 4 в качестве иллюстрации приведена однолинейная схема электроснабжения ЗРУ-10 кВ НПС.

ВИД НА ПРОГОРЕВШИЕ ШИРОКИЕ ГРАНИ ПОЛУКАТУШЕК

Рис. 5

ВЫПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПРОВОДНИКОВ, ЛЕЖАЩИХ НА УЗКОЙ ГРАНИ ПОЛУКАТУШКИ, ПРИМЫКАЮЩЕЙ КО ДНУ ПАЗА

Рис. 6

ТОКАРНЫЕ СТРУЖКИ

Рис. 7

СВАРОЧНЫЙ КОРОЛЕК

Рис. 8

После ввода в эксплуатацию через некоторое время вследствие повреждения изоляции обмотки статора были выведены из работы три ЭД, имевших разное время наработки и неодинаковое число пусков — остановов (табл. 1). При расследовании причин аварий было установлено, что их развитие, приведшее, в конечном счете, к повреждениям ЭД, начиналось с появления замыкания на землю в обмотке статора. Как показала расшифровка осциллограмм аварийного отключения ЭД, зафиксированного на каждой НПС осциллографом устройства SEPAM SRT79A, на начальном этапе развития аварии возникший пробой изоляции статора на землю каждого ЭД носил перемежающийся характер с постепенным нарастанием тока замыкания, что не создало в момент первого появления однофазного замыкания условий для срабатывания ТЗНП. После отключения ЭД защитами дальнейшее развитие аварии и характер повреждения изоляции, как видно из табл. 1, различались.

Так, на НПС с условным № 1 отключение вакуумным выключателем ЭД 6300 кВт, 10 кВ произошло после третьего скачка тока нулевой последовательности, когда он несколько превысил уставку срабатывания защиты (ток 3 А, выдержка времени 500 мс). Через 0,6 с после отключения ЭД однофазное замыкание перешло в двухфазное между фазами B и C вследствие того, что магнитный поток ротора на выбеге ЭД спадал постепенно (с постоянной времени цепи ротора), и напряжение статора подпитывало точку короткого замыкания (КЗ). В контуре, образованном этими фазами и нейтралью электродвигателя, ток вырос до значения порядка 2,24 кА.

Следствием междуфазного КЗ явилось повреждение изоля-

ции статора ЭД, при котором, как показало его последующее обследование на заводе «Сименс-Электропривод», в зоне первого вентиляционного канала со стороны рабочего конца вала выгорела витковая и главная изоляция обмотки статора, расплавились элементарные проводники витков, прилегающих к зубцу между пазами (рис. 5, 6).

На НПС с условным № 2 (табл. 1), как следует из анализа осциллограмм, зафиксированных встроенным в SEPAM SRT79A аварийным осциллографом, при первом появлении замыкания обмотки статора ЭД 8000 кВт, 10 кВ на землю за время 420 мс, вызвавшем запуск ТЗНП, он не был отключен защитой, так как ее временная уставка по току 2 А составляла 500 мс. При появлении второго замыкания на землю ток замыкания резко вырос, примерно до 46 А, и ЭД был отключен вакуумным выключателем по сигналу этой защиты через 528 мс. Дифференциальная защита при этом не работала, так как ток небаланса составил 62 А, что значительно ниже уставки срабатывания 264 А. Последующее обследование этого ЭД показало, что авария сопровождалась пробоем и прогоранием главной изоляции фазы А обмотки статора в пазу с верхней полукатушки в этом пазу на активную сталь на краю паза. Как производственный дефект можно оценить обнаруженные после разборки и обследования поврежденного на НПС-38 ЭД 6300 кВт в карманах рым-болта со стороны рабочего конца вала ротора, а также на выпуклости перед третьим шлицом охлаждения спиралевидные стальные стружки неокрашенного и местами проржавевшего металла длиной от 3 до 7 см, возникшие, по-видимому, в процессе изготовления ЭД на заводе при выполнении фрезерных или токарных работ

ОБРАЗЦЫ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ПОЛУКАТУШЕК: ВВЕРХУ — ВЕРХНИЕ, ВНИЗУ — НИЖНИЕ ПОЛУКАТУШКИ

Рис. 9

СТРУКТУРА ГЛАВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ (ВИДНЫ НЕБОЛЬШИЕ ВОЗДУШНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ)

Рис. 10

РАЗРЕЗ ЛОБОВОЙ ЧАСТИ ПОЛУКАТУШКИ НА ПРЯМОЛИНЕЙНОМ УЧАСТКЕ (СТРЕЛКОЙ ПОКАЗАНО РЕБРО, НА КОТОРОМ ПРОБИЛАСЬ ГЛАВНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ)

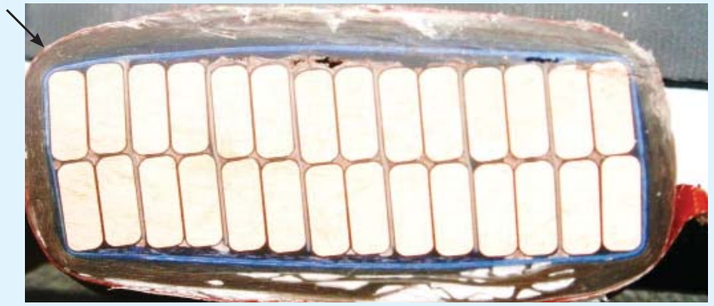


Рис. 11

ПРОГАР ГЛАВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЕРХНЕЙ КАТУШКИ В МЕСТЕ ЕЕ ПРОБОЯ

Рис. 12

(рис. 7). В статоре был обнаружен также сварочный стальной королек (рис. 8).

При лабораторных исследованиях фрагментов поврежденной обмотки статора поврежденных ЭД (были вырезаны образцы лобовых частей и образцы демонтированной из пазов главной изоляции), проводившихся в «НТЦ ФСК ЕЭС», в лобовых частях полукатушек данного ЭД и было отмечено некоторое искажение прямоугольного контура поперечного сечения токоведущей лобовой части в месте перехода от прямолинейного участка в эвольвентный участок (рис. 9). Кроме того, между главной и витковой изоляцией на широких гранях отчетливо видны воздушные включения в виде небольших воздушных пузырьков (рис. 10). Следует отметить, что наличие газовых включений приводит к некоторому ослаблению изоляции, может вызывать в ней возникновение частичных разрядов [35–37].

При обследовании поврежденного ЭД 8000 кВт, 10 кВ на заводе «Сименс-Электропривод» было установлено, что пробой главной изоляции обмотки статора произошел с верхней полукатушки фазы А на активную сталь на краю паза (рис. 11). В соответствии со схемой обмотки статора ЭД эта полукатушка соединена непосредственно с нулевым выводом, т.е. с нейтралью. При пробое прогорела главная изоляция катушки (рис. 12), незначительно оплавились элементарные проводники на ребрах их поперечного сечения (рис. 13), оплавилось железо сердечника статора в месте пробоя в виде двух капель металла размером 0,5 и 1,0 мм в первом сегменте пакета активной стали.

При обследовании поврежденного на НПС ЭД 8000 кВт с условным № 2 (табл. 1) в его корпусе в месте ввода трубок датчиков давления были обнаружены металлические стружки, попавшие, по-видимому, при сборке электродвигателя на заводе.

Для оценки максимальных уровней и частот электрических воздействий на изоляцию статора синхронных электродвигателей H-modin 1DX, коммутируемых вакуумными выключателями, были проведены исследования электромагнитных переходных процессов в системе «сеть электроснабжения — выключатель — кабельная линия — ЭД». Такие исследования можно выполнять с использованием математической модели этой системы и путем проведения натурных экспериментов на конкретном объекте [5, 6, 8,

38, 39]. Математическое моделирование сводится к составлению и решению системы дифференциальных уравнений для схемы замещения системы «сеть — выключатель — кабельная линия — электродвигатель» при определенных упрощающих допущениях, что дает возможность исследовать основные зависимости, описывающие эти процессы для электрических машин, но не позволяет в полной мере оценить влияние на полученные результаты характеристик реальной сети электроснабжения, типа и параметров конкретного вакуумного выключателя при одновременном отсутствии достоверных параметров схем замещения электродвигателей и кабельной линии.

Экспериментальные исследования электромагнитных процессов в условиях действующего электрооборудования НПС сопряжены с определенными организационными трудностями и требуют значительных затрат времени. В то же время такой метод измерения параметров процессов в эксплуатационных режимах сети электроснабжения с электродвигателями, коммутируемыми вакуумными выключателями, обеспечивает наибольшую достоверность получаемых результатов, позволяя одновременно оценить адекватность математической модели и точность полученных с ее помощью результатов. Для оценки параметров электрических воздействий на изоляцию статора синхронных электродвигателей H-modin 1DX 6300 кВт и 8000 кВт напряжением 10 кВ в эксплуатационных режимах и получения достоверных результатов о причинах их повреждений на НПС-38 и НПС-30 были проведены комплексные экспериментальные исследования электромагнитных процессов при коммутациях электродвигателей вакуумными выключателями. В проведении экспериментальных работ на НПС принимал участие к.т.н. А.Н. Новаковский (АО «НТЦ ФСК ЕЭС»), Р.Р. Нуриев, А.П. Спицын (ООО «Дальнефтепровод»), Экерхард Питтиус, Герхард Неезер, Марат Виноградский (Siemens AG), А.Н. Агафонов (ООО «Сименс», Россия), С.В. Павленко (ООО «ТранснефтьЭлектросетьСервис»), С.В. Жичкин (ОАО «Гипротрубопровод»).

Для выявления наиболее опасных электрических воздействий на изоляцию электродвигателей на НПС-30 и НПС-38 в соответствии с разработанной и согласованной с компаниями Siemens, «Транснефть» и «Дальнефтепровод» программой исследовались параметры переходных электромагнитных процессов в следующих режимах:

- штатный пуск электродвигателя МНА;
- отключение электродвигателя вакуумным выключателем при штатном останове МНА;
- отключение электродвигателя из штатного режима работы МНА под нагрузкой по сигналу, имитирующему аварию;
- отключение неразвернувшегося при пуске на холостом ходу электродвигателя МНА (отключение «большого» индуктивного тока) через 5 с по сигналу, имитирующему аварию;
- отключение развернувшегося при пуске на холостом ходу до близкой к подсинхронной частоте вращения электродвигателя МНА по сигналу, имитирующему аварию (отключение «малого» индуктивного тока);
- отключение на ПС НПС-30 элегазового выключателя на стороне 220 кВ трансформатора Т2 220/10 кВ по сигналу, имитирующему аварию, приводящее к обесточиванию подключенной к этому трансформатору секции II ЗРУ-10 кВ с работающим под нагрузкой электродвигателем МНА № 3 и последующим переключением быстродействующим тиристорным АВР (ТАВР) обесточенной секции на ее электроснабжение от другой секции, питающейся от другого трансформатора Т1 220/10 кВ;
- включение электродвигателя МНА № 1 вакуумным выключателем при пуске и его отключение через 5 с по сигналу, имитирующему аварию (отключение «большого» индуктивного тока).

ОПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПРОВОДНИКОВ КАТУШКИ НА РЕБРАХ ИХ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Рис. 13

При этом особое внимание уделялось измерению параметров электромагнитных процессов для двух наиболее тяжелых с точки зрения возникновения перенапряжений на изоляции статора: при включении ЭД в условиях возможного дребезга контактов в вакуумной дугогасящей камере выключателя и при выключении неразвернувшегося ЭД (такой режим достаточно часто возникает при срабатывании защит технологического механизма, прерывающих режим пуска

ОСЦИЛЛОГРАММА ВКЛЮЧЕНИЯ ЭД № 1 В ОПЫТЕ «ВКЛЮЧЕНИЕ И ОТКЛЮЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ 5 С НЕРАЗВЕРНУВШЕГОСЯ ЭД»

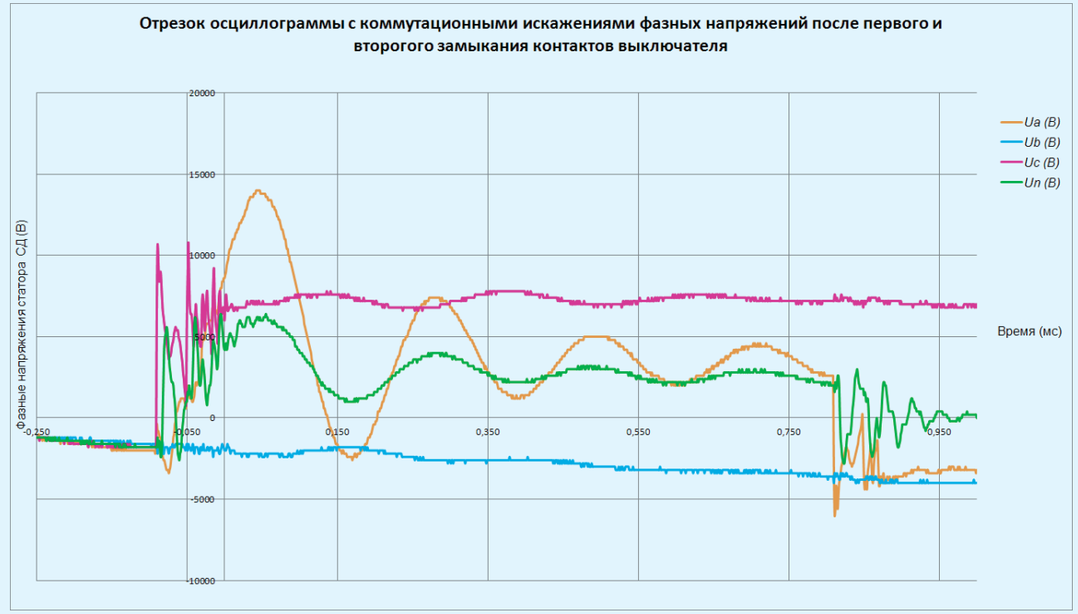


Рис. 14

ЭД). В обоих этих режимах природа возникновения перенапряжения на изоляции статорной обмотки коммутируемого ЭД достаточно схожа [8, 39, 40].

Для получения объективной статистики на НПС проводилось порядка 15 опытов с осциллографированием процессов при коммутациях выключателей.

При исследовании электромагнитных процессов на ЭД 6300 кВт, 10 кВ с условным № 1 наибольшие напряжения на изоляции статора электродвигателя зафиксированы в режиме его включения при пуске на холостом ходу, как видно на осциллограмме на рис. 14. В этом режиме измеренная амплитуда максимального напряжения «от пика к пику», действующего на изоляцию статора, составляет 20 кВ (около $3{,}33 \cdot U_{фном}$), максимальная частота электромагнитных коммутационных процессов — 25 кГц, а максимальное значение изменения крутизны фазного напряжения — $(dU/dt)_{макс} \approx$ 0,5 кВ/мкс. Также было установлено, что включение электродвигателя сопровождается неодновременным замыканием контактов выключателя.

В другом опыте с этим же электродвигателем (рис. 15) в режиме «включение и отключение через 5 с неразвернувшегося ЭД» при замыкании второго и третьего контактов фазы (фазы С и А) выключателя частота высокочастотных колебаний электромагнитных процессов составляет 38 кГц. В этом режиме была зафиксирована максимальная частота высокочастотных колебаний 166 кГц. Наибольшее напряжение, воздействующее на изоляцию статора в этом режиме, не превосходило $2{,}0 \cdot U_{фном}$ (12,4 кВ) при максимальной крутизне фазного напряжения $(dU/dt)_{макс} \approx$ 6,2 кВ/мкс.

Во всех проведенных опытах отключение электродвигателя не сопровождалось заметными перенапряжениями на зажимах статора.

Из результатов испытаний ЭД с условным № 1 на НПС следует,

ИЗ «ГОСТ 3 МЭК/ТС 60034-17 2009. МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ. ЧАСТЬ 17»

Настоящий стандарт определяет критерии выбора компонентов частотно-регулируемого электропривода и их влияние на работу двигателя в составе этого электропривода...

3 Характеристики двигателя

В период коммутации ток инвертора проходит по статорным обмоткам двигателя, поэтому для правильного выбора цепи коммутации необходимо знать эквивалентную схему асинхронного двигателя.

9 Срок службы изоляции

Система изоляции электрической машины при ее питании от преобразователя испытывает гораздо большее число неблагоприятных факторов, чем при питании от синусоидальной сети.

При питании двигателей от инверторов тока с «медленной» коммутацией, как это имеет место в тиристорных инверторах, на интервалах коммутации возникают импульсы перенапряжения, оказывающие воздействие на основную и межвитковую изоляцию. Однако коммутационные пики обычно не приводят к разрушению изоляции, поскольку время их нарастания довольно велико, а частота следования достаточно мала.

При питании двигателя от инверторов напряжения, укомплектованных, как правило, IGBT-транзисторами, имеющими высокую частоту коммутации, значительный темп нарастания напряжения оказывает существенное влияние на межвитковую изоляцию, особенно в зоне крайних витков.

что во всех опытах включения/отключения не были зафиксированы коммутационные перенапряжения, недопустимые для изоляции статора. Необходимо отметить, что эти результаты совпадают с исследованиями, результаты которых приведены, в частности, в работах [8, 38, 39]. Очевидно, что при коммутациях вакуумного выключателя витковая изоляция статора присоединенного к нему электродвигателя подвергается неблагоприятным для нее воздействиям регулярных высокочастотных процессов с частотами, достигающими 166 кГц и выше, с крутизной импульсных высокочастотных колебаний фазного напряжения $(dU/dt)_{макс} \approx 6{,}4$ кВ/мкс.

Исследования электромагнитных коммутационных процессов на ЭД с условным № 3 на НПС дали в общем схожие результаты. Так, при включении ЭД (рис. 16) из-за дребезга контактов в вакуумной дугогасящей камере были зафиксированы максимальная амплитуда высокочастотных процессов 14 400 В ($2{,}4 \cdot U_{фном}$), максимальная частота высокочастотных колебаний 250 кГц и максимальное значение крутизны изменения фазного напряжения $(dU/dt)_{макс} > 7{,}2$ кВ/мкс.

Проведенные исследования и их анализ показали, что причиной повреждения всех трех ЭД явилась электрическая эрозия корпусной изоляции в зоне выхода обмотки из пазов статора, характеризующаяся постепенной деградацией слоев изоляции, которая возникала и развивалась в результате совместного действия емкостных токов и короны [9]. Емкостные токи, по существу, являются токами замыкания на землю через переходное сопротивление. Оценить величину емкостного тока фазы можно по следующему простому соотношению:

$$I_{ОЗЗ} = U_Ф / 3X_С + R_П , \qquad (1)$$

где $I_{ОЗЗ}$ — ток однофазного замыкания на землю; $U_Ф$ — фазное напряжение; $X_С$ — емкостное сопротивление фазы; $R_П$ — переходное сопротивление.

ОПН, включенные параллельно контактам вакуумного выключателя, как показывает опыт эксплуатации, далеко не всегда обеспечивают надежную защиту ЭД на присоединениях с вакуумными выключателями при таких высокочастотных процессах вследствие наличия у них так называемой «зоны замирания», которая возникает при значении частоты коммутационных импульсов напряжения 45 кГц и выше [39]. «Зона замирания» характеризуется тем, что, хотя на первоначальном интервале времени амплитуда коммутационного импульса превышает порог срабатывания ОПН, ограничение амплитуды коммутационных импульсов наступает по истечении некоторого промежутка времени. Как уже отмечалось, осциллографирование переходных процессов в ЭД при коммутациях вакуумного выключателя показало, что в обмотке статора возникает высокочастотный процесс, максимальная амплитуда импульсов напряжения которого составила 20 кВ (~2,35 амплитуды $U_{фном}$ напряжения ЭД), максимальная частота — 250 кГц, длительность процесса — до 1 мс. При этом емкостное сопротивление фазы уменьшается пропорционально отношению частот *f250 000 / f50* = 5000 до величины

$$X_{С\ 250\ кГц} = X_{С\ 50\ Гц} / 5000 = 14 \cdot 10^3 / 5000 = 2{,}8\ Ом.$$

Расчетная величина емкостного тока $I_{ОЗЗ\ 250кГц}$ на частоте 250 кГц при амплитуде импульса 20 кВ с учетом выражения (1) составит:

$$I_{ОЗЗ\ 250\ кГц} = U_{ампл.} / (3X_{С\ 250\ кГц} + R_П) = 20\ 000/(3 \cdot 2{,}8 + R_П) \qquad (2)$$

Из выражения (2) следует, что величина емкостного тока в ветви фазы ЭД во время анализируемого переходного процесса будет определяться величиной переходного сопротивления $R_П$ (в данном случае величиной поверхностного сопротивления противокоронного покрытия). В табл. 2 приведены расчетные значения емкостного тока фазы на частоте 250 кГц в зависимости от величины $R_П$.
В случае, когда на пути стекания емкостного тока окажется участок с низким активным поверхностным сопротивлением (например, из-за загрязнения, увлажнения, и т.п.), то произойдет стягивание линий тока и возрастание его местной плотности. В результате выделяющиеся тепловые потери вызовут нагрев участка вплоть до появления дыма и даже возгорания шнуровых бандажей, что неоднократно наблюдалось на электростанциях, например, при испытании обмоток статоров генераторов повышенным переменным напряжением.

На высоких частотах напряжение короны почти совпадает с пробивным, тогда как на промышленной частоте напряжение короны существенно меньше пробивного. Для обеспечения надежной защиты изоляции синхронных ЭД H-modin 1DX, эксплуатируемых на НПС на присоединениях с вакуумными выключателями, компаниям Siemens, «Транснефть» и «Дальнефтепровод» было рекомендовано применить защитные *RC*-цепочки. Установка таких цепочек существенно снижает частоту собственных колебаний электромагнитных процессов при коммутации ЭД вакуумными выключателями, снижает вероятность повторных зажиганий дуги в вакуумной дугогасящей камере. Конденсаторы защитных цепочек уменьшают волновое сопротивление цепи «сеть — кабельная линия — электродвигатель»,

ЗАВИСИМОСТЬ ЕМКОСТНОГО ТОКА ОТ СОПРОТИВЛЕНИЯ $R_П$

Величина сопротивления $R_П$, Ом	1	10	100	1000	10 000
Импульс емкостного тока, А	2127,7	1087,0	184,5	19.8	2,0

Таблица 2

ОСЦИЛЛОГРАММА ВКЛЮЧЕНИЯ ЭД № 1 ПРИ ПУСКЕ НА ХОЛОСТОМ ХОДУ

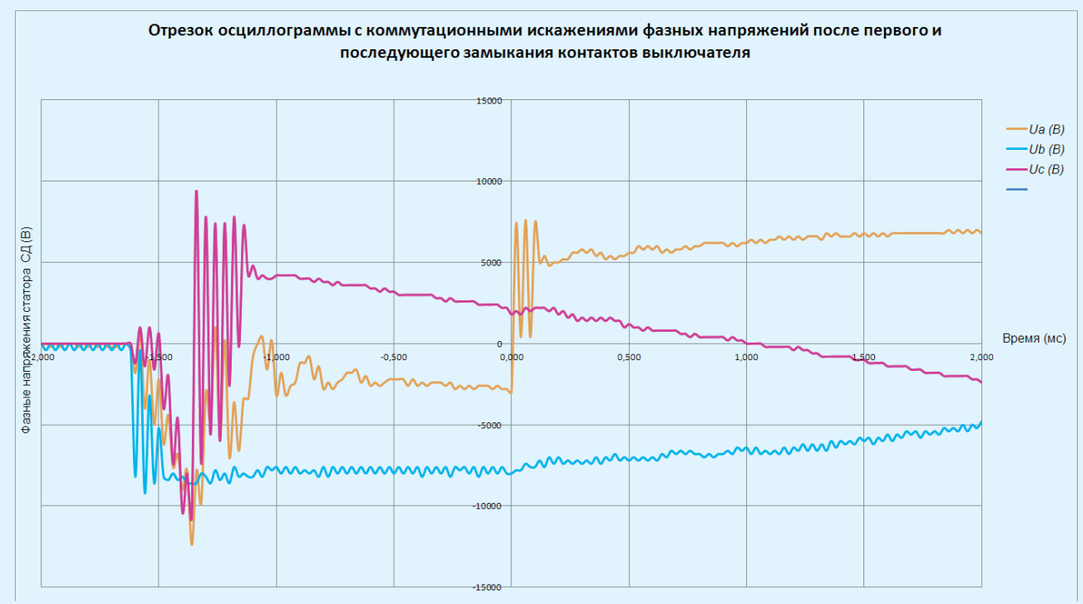


Рис. 15

ОСЦИЛЛОГРАММА ВКЛЮЧЕНИЯ ЭД № 3

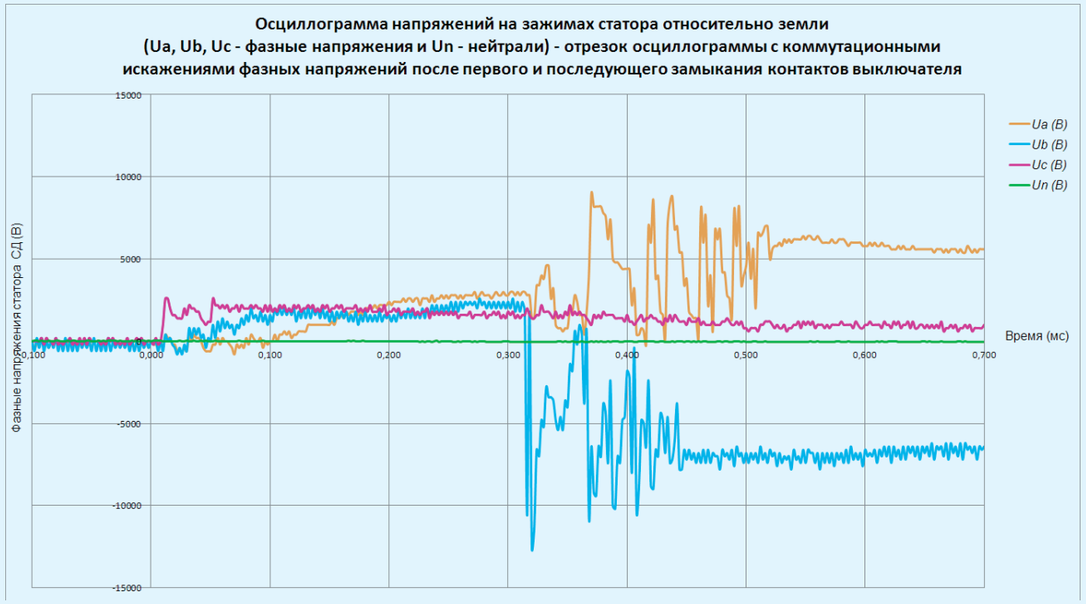


Рис. 16

ограничивая перенапряжения, вызванные срезом тока. Резисторы способствуют затуханию колебательного процесса. Несомненным достоинством демпфирующей *RC*-цепочки является то, что ее защитный эффект проявляется с самого начала возникновения переходных процессов. Схема соединения *RC*-цепочек в защитном устройстве и способ подключения такого устройства к защищаемому электродвигателю имеют важное значение.

Достаточно простым и часто применяемым техническим решением является рекомендуемое в Руководстве по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений (РД 153-34-35-125-99) защитное устройство на основе трех *RC*-цепочек, подключаемых между фазой и землей непосредственно у выводов статора электродвигателя, что показано на рис. 17.

В ряде случаев можно допустить подключение *RC*-цепочек в начале кабеля в ячейке выключателя, если расчетом будет показано, что при этом обеспечивается требуемый уровень ограничения перенапряжений. В то же время установка дополнительной емкости между фазой и землей увеличивает ток замыкания на землю, так как емкость конденсатора *RC*-цепочки в соответствии с рекомендациями РД выбирают в пять раз большей, чем сумма емкостей защищаемого присоединения (сумма емкости электродвигателя $C_{ЭД}$ плюс рабочая емкость кабеля $C_р = C_ф + 3C_{фф}$, где $C_ф$ и $C_{фф}$ — фазная и межфазная емкости питающего кабеля). Кроме того, в этом случае при возникновении однофазного тока замыкания на землю ухудшаются условия самопогасания дуги. Это ограничивает область применения такой защиты электродвигателей в сетях, где могут возникать значительные токи замыкания, поскольку их максимальное значение нормируется [40, 41].

Соединение *RC*-цепочек в «звезду» можно не заземлять. Увеличение емкости между фазами статора позволяет исключить повторные зажигания дуги, сгладить высокочастотные составляющие тока и ограничить скорость нарастания напряжения в моменты коммутации или при возникновении однофазного замыкания на землю. Кроме того, при изолированной нейтральной точке защитное устройство не оказывает влияния на величину и характер тока однофазного замыкания на землю, не требует перенастройки защиты от однофазных замыканий или добавочной компенсации емкостного тока. Частичная компенсация индуктивной составляющей тока нагрузки электродвигателя приводит к уменьшению потерь в кабельной линии. Устройство обеспечивает хорошую защиту межфазной изоляции и, в меньшей степени, фазной изоляции относительно земли [42].

Такой же защитный эффект обеспечивает пересоединение трех фазных *RC*-цепочек, включенных в «звезду» с изолированной нейтралью, в межфазный «треугольник». При этом эффективность защиты электродвигателя сохраняется и при включении *RC*-цепочек между фазами в начале кабельной линии (рис. 18) [7]. Поскольку при межфазном включении *RC*-цепочек ток замыкания на землю не увеличивается, это позволяет применять такое устройство защиты электродвигателя во всех сетях независимо от тока замыкания на землю. В силу меньшей емкости конденсаторов рассматриваемое устройство защиты имеет меньшие габариты и массу. При установке защитных *RC*-цепочек в распредустройстве обеспечивается также защищенность присоединений при внешних электрических воздействиях.

В работе [44] предложена оптимальная защита главной и витковой изоляции, обеспечиваемая устройством, содержащим шесть *RC*-цепочек, три из которых включают между фазами и три — между фазой и землей (рис. 19). Включение трех *RC*-цепочек между фазами в начале питающего кабеля и трех между фазой и землей обеспечивает разгрузку изоляции статора ЭД за счет эффективного демпфирования высокочастотных перенапряжений. В то же время

ЗАЩИТНОЕ УСТРОЙСТВО ЭД НА ОСНОВЕ ТРЕХ *RC*-ЦЕПОЧЕК ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА»

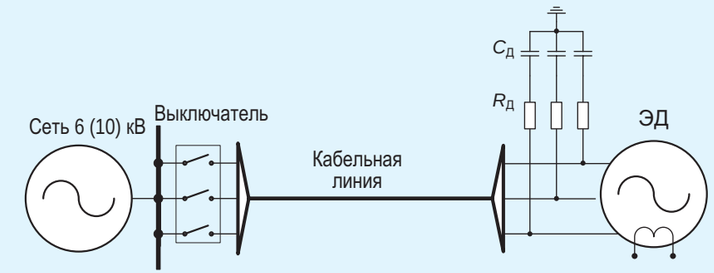


Рис. 17

ЗАЩИТНОЕ УСТРОЙСТВО ЭД НА ОСНОВЕ ТРЕХ *RC*-ЦЕПОЧЕК ПО СХЕМЕ МЕЖФАЗНЫЙ «ТРЕУГОЛЬНИК»

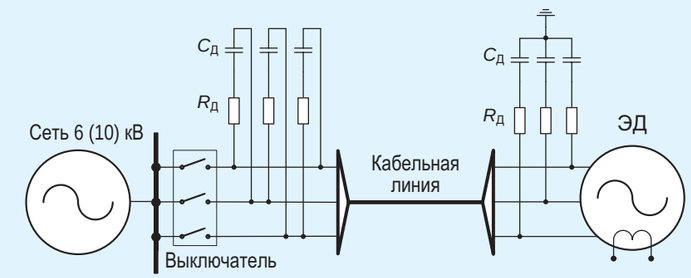


Рис. 18

какого-либо практического применения такое устройство защиты ЭД, коммутируемое вакуумными выключателями, в силу его громоздкости и многоэлементности, повышенных массогабаритных показателей на практике не получило.

В работе [44] предложен комбинированный резистивно-емкостный ограничитель перенапряжений с применением четырех *RC*-цепочек, схема которого показана на рис. 20. В этой схеме, как утверждается в работе [8], высокий защитный эффект (глубокое демпфирование высокочастотных процессов и глубокое ограничение перенапряжений, имеющих высокочастотный характер) достигается за счет того, что *RC*-цепочки включены как между фазами, так и между фазой и землей. Это позволяет достаточно эффективно обеспечить разгрузку как главной

ЗАЩИТНОЕ УСТРОЙСТВО ЭД НА ОСНОВЕ ШЕСТИ *RC*-ЦЕПОЧЕК

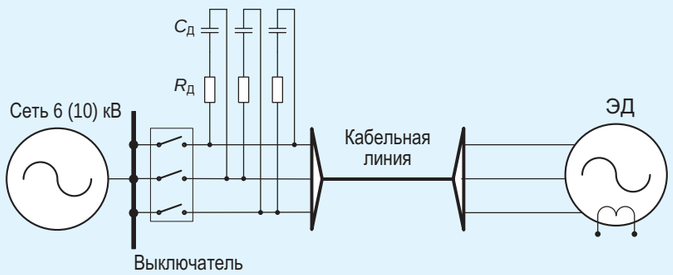


Рис. 19

ЗАЩИТНОЕ УСТРОЙСТВО ЭД ИЗ ЧЕТЫРЕХ *RC*-ЦЕПОЧЕК

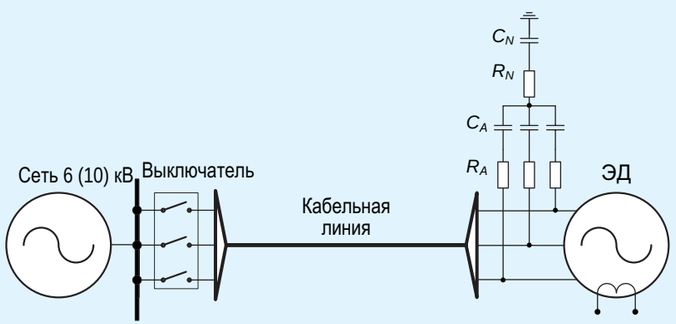


Рис. 20

(фазной изоляции относительно земли), так и межфазной (витковой) изоляции. Несмотря на сокращение числа *RC*-цепочек с шести до четырех, такое устройство тем не менее имеет в целом повышенные массогабаритные показатели и увеличенные потери в резисторах.

Исходя из сравнительного анализа приведенных схем и расчета их параметров, для защиты ЭД было рекомендовано применить устройство по схеме трех фазных *RC*-цепочек, включенных в «звезду» с изолированной нейтралью, с параметрами $C_Д$ = 0,35 мкФ; $R_Д$ = 30 Ом.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Tavner, L. Ran, J. Penman, H. Sedding. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines-Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2008.
2. Е.К. Иноземцев. Ремонт мощных электродвигателей. М.: Энергоиздат, 1985.
3. А.Д. Беспрозванный, А.И. Наминов, Т.М. Нестерова. Повышение надежности работы электродвигателей собственных нужд электростанций // Энергетика и электрификация. 1980. С. 12–15.
4. Н.М. Ваксер. Изоляция электрических машин. Л.: ЛПИ, 1985.
5. С.А. Бабичев. Комплексный анализ условий эксплуатации изоляции обмоток статоров электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Вестник ИГЭУ. Вып. 2. 2009.
6. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций / Под ред. О.В. Крюкова. Н. Новгород: ОАО «Гипрогазцентр», 2010.
7. П.А. Маткин. Надежность двигателей собственных нужд электростанций. // В сборнике трудов VIII Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая» 19–22.04.2016 г. Кемерово: Изд-во КГТУ.
8. К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, О.М. Лаптев. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008.
9. Г.Б. Лазарев, Ю.Н. Саморoдов. Аварийность генераторов и синхронных электродвигателей. Новые проблемы // В сборнике докладов научно-технической конференции «Актуальные вопросы и перспективы развития электромашиностроения» 03.12.2015 г. М.: АЭН РФ.
10. А.Г. Гумеров, Р.М. Гумеров, А.С. Акбердин. Эксплуатация оборудования нефтеперекачивающих станций. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001.
11. В.А. Шабанов, М.И. Ханимьянов, С.Ф. Шарикова и др. Исследования влияния частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов на износ изоляции электродвигателей при охлаждении после пуска // Нефтегазовое дело. Прикладные и академические исследования. 2014. Т. 12. № 3.
12. Г.Н. Петров, А.И. Абрамов. Междувитковые напряжения в обмотках электрических машин при волновых процессах // Электричество. 1954. № 7.
13. Б. Геллер, А. Веверка. Волновые процессы в электрических машинах. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960.
14. G.C. Stone, S.R. Campbell, H.G. Sedding. Analysis of the effect of adjustable winding insulation // CIGRE. 1998. P. 11–202.
15. Г.Б. Лазарев. Обеспечение электромагнитной совместимости при применении частотно-регулируемых асинхронных электроприводов в системах электроснабжения собственных нужд ТЭС // Вестник ВНИИЗ-2000.
16. ГОСТ 3 МЭК/ТС 60034-17 2009. Машины электрические вращающиеся. Часть 17. Руководство по применению асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при питании от преобразователей. М.: Стандартинформ, 2011.
17. ГОСТ Р 55136-2012/IEC/TC 60034-25-2007. Машины электрические вращающиеся. Часть 25. Руководство по конструкции и характеристикам машин переменного тока, специально предназначенных для питания от преобразователей. М.: Стандартинформ, 2014.
18. Г.Б. Лазарев. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных систем // Новости электротехники. 2005. № 2 (32).
19. Б.В. Гузеев, М.И. Хакимьянов. Современные промышленные преобразователи частоты для регулирования асинхронных и синхронных двигателей // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 93.
20. Н. Донской, А. Иванов, В. Матисон, И. Ушаков. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и энергетики // Силовая электроника. 2008. № 1.
21. Ю.Б. Казаков, А.А. Шумин, В.А. Андреев. Зависимость потерь в асинхронных двигателях от параметров широтно-импульсного регулирования напряжения // Вестник ИГЭУ. 2007. Вып. 3.
22. Е.Ю. Анишев, Г.Б. Лазарев. Особенности применения преобразователей частоты в мощном электроприводе циркуляционных насосов // Электротехника. 2007. № 10.
23. Г.Б. Лазарев. Электромагнитная совместимость высоковольтных преобразователей частоты с системами электроснабжения и электродвигатели собственных нужд тепловых электростанций // Электротехника. 2004. № 10.
24. Б.Е. Калашников. Проблема «длинного кабеля» в электроприводах с IGBT-инверторами // Электротехника. 2002. № 12.
25. С.Г. Забровский, Г.Б. Лазарев, А.Ю. Штейнберг. Перенапряжения в системах с тиристорными преобразователями. Кишинев: Штиинца, 1979.
26. F. De Winter, N. Zargari, S. Rizzo, Y. Xiao. Medium Voltage Drives: are isolation transformers required // Material IEEE. Paper № PCIC-2202-23. Rockwell Automation, Canbrige, ON., Canada, 2002.
27. Г.Б. Лазарев. Электромагнитная совместимость высоковольтных бестрансформаторных преобразователей с регулируемой выходной частотой // Электротехника. 2012. № 6.
28. В.М. Пак, С.Г. Трубачев. Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 2007.
29. Трехфазные синхронные электродвигатели 800 кВт...35 000 кВт // Техническая информация VEM. SWD/04-007.R/0805GD.
30. Трехфазные высоковольтные асинхронные электродвигатели 140...28 000 кВт // Техническая информация VEM. SWD/04-002.D/0304GD.
31. Asynchronmotoreu Hochs pannungs — Systembanreihe // Техническая информация LDW 7.022/0501 DE/EN.
32. Isoliersystem MICALASTIC fur Hochspannungswicklungen // Siemens. Kundenin fotmation fur Isolationstechnik. TU-1K 019.
33. В.А. Маслов, Н.С. Окнин и др. Пропиточные компаунды класса нагревостойкости Н-С // Электротехника. 2009. №11.
34. В.А. Маслов, А.Г. Гроздов и др. Электроизоляционный пропиточный эпоксиизоцианитовый компаунд // Электротехника. 2010. № 10.
35. И.А. Андреев, А.А. Безбородов. Разработка методики идентификации дефектов изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета «Электротехника». 2013. № 1.
36. В.П. Вдовико. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007.
37. Павел Трнка и др. Диагностика состояния изоляции высоковольтных машин в эксплуатации // IEEE Electrical Insulation. 2014. № 1 .
38. И.Л. Дегтярев. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов, сопровождающих коммутации вакуумными выключателями // Дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.14.12). Новосибирск, 2006.
39. Д.В. Барышников. Экспресс-методы оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6–10 кВ промышленных предприятий // Дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Красноярск, 2010.
40. Н.Н. Беляков. Защита от перенапряжений установок с вакуумными выключателями // Электрические станции. 1994. № 9.
41. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения // Под ред. И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова. М.: Энергоатомиздат, 1989.
42. Патент на полезную модель № 44008, 2005.
43. Патент № 2305887. Бюллетень № 25, 2007.
44. Патент № 2394326. Бюллетень № 18, 2010.

ИЗ «ГОСТ Р 55136-2012/ IEC/TC 60034-25-2007. МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ. ЧАСТЬ 25»

1 Область применения

Объектом стандартизации являются особенности проектирования и характеристики электрических машин переменного тока, предназначенных для питания от преобразователей, параметры соответствия и взаимодействие между двигателем и преобразователем, включая правила монтажа и установки.

4.2 Информация о системе

Лучшим способом обеспечить требуемую работу всей системы является учет всей информации о нагрузке электропривода, двигателе, преобразователе и системе электроснабжения. В общем случае эта информация должна включать:

- требования к мощности или к вращающему моменту на различных скоростях;
- желаемый диапазон частоты вращения и нагрузки двигателя;
- требования к темпам ускорения и замедления при управлении процессом;
- исходные требования, включая частоту пусков и параметры нагрузки (приведенную к двигателю инерционность, момент нагрузки во время пуска);
- рабочую циклограмму механизма (непрерывный процесс или комбинация пусков, остановок и изменений скорости (см. 3.1 МЭК 60034-1);
- общее описание объекта, включая окружающую среду, в которой будут работать компоненты электропривода.

НОВЫМ ТРЕБОВАНИЯМ — ПРОВЕРЕННЫЕ РЕШЕНИЯ

На правах рекламы

RTSoft
средства и системы автоматизации

В конце сентября 2016 года ПАО «ФСК ЕЭС» утвердило новый стандарт организации СТО 56947007-25.040.40.226-2016 «Общие технические требования к АСУТП ПС ЕНЭС. Основные требования к программно-техническим средствам и комплексам». В данном стандарте впервые в отечественной нормативной документации определены требования к устройствам связи с объектом (выносное УСО), устанавливаемым в непосредственной близости от первичного оборудования.

Специалистами АО «РТСофт» разработан типовой уличный шкаф для управления присоединениями на ОРУ 750–110 кВ. Применение таких шкафов позволяет не просто сэкономить несколько километров медных кабелей, но и уменьшить требуемую площадь здания ОПУ за счет радикального сокращения количества шкафов АСУТП. На сегодняшний день уже имеется значительный положительный опыт эксплуатации подобных шкафов в различных климатических зонах.

Функциональность шкафа управления присоединениями значительно шире, чем просто сбор сигналов положения коммутационных аппаратов и выдача команд управления. В качестве основных особенностей можно отметить:

- ведение внутреннего журнала событий с точностью фиксации до 1 мс;
- подключение мобильной панели управления для доступа к журналам событий и управления присоединением;
- реализацию логики оперативной блокировки;
- осуществление мониторинга технического состояния выключателей, разъединителей и другого оборудования ОРУ;
- наглядную электромеханическую схему управления присоединением, выполняемую в отдельном отсеке шкафа, которая незаменима для работы зимой и в условиях непогоды;
- резервированную систему электроподогрева.

Использование нашего решения позволяет реализовать полноценное и безопасное местное управление присоединением, особо востребованное в случае отказа всех прочих систем АСУТП и при выполнении работ персоналом на ОРУ.

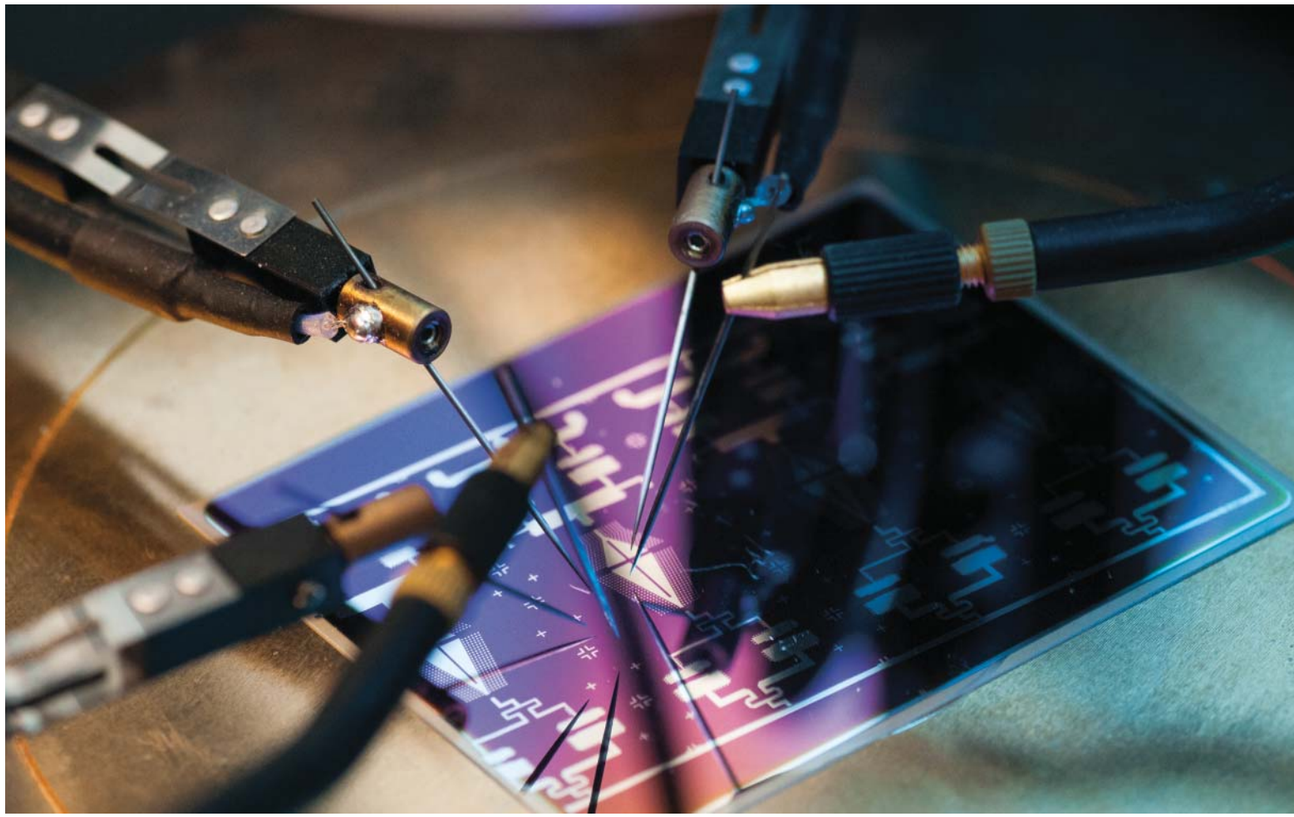
Рис. 1.
Демонстрация уличного шкафа управления присоединением 220 кВ на стенде «РТСофт»

АО «РТСофт»
www.rtsoft.ru
E-mail: rtsoft@rtsoft.ru

NDEXPO 2017

20 – 22 марта · МОСКВА
Центр международной торговли

IV МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ-ВЫСТАВКА «NDExpo 2017» — «ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ»



ОРГАНИЗАТОР
РОСАТОМ

NEW ENERGY FOR DEVELOPMENT NDExpo

ОПЕРАТОР
АТОМЭКСПО

реклама

www.ndexpo.ru