ЭРОЗИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПОДШИПНИКОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ И МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

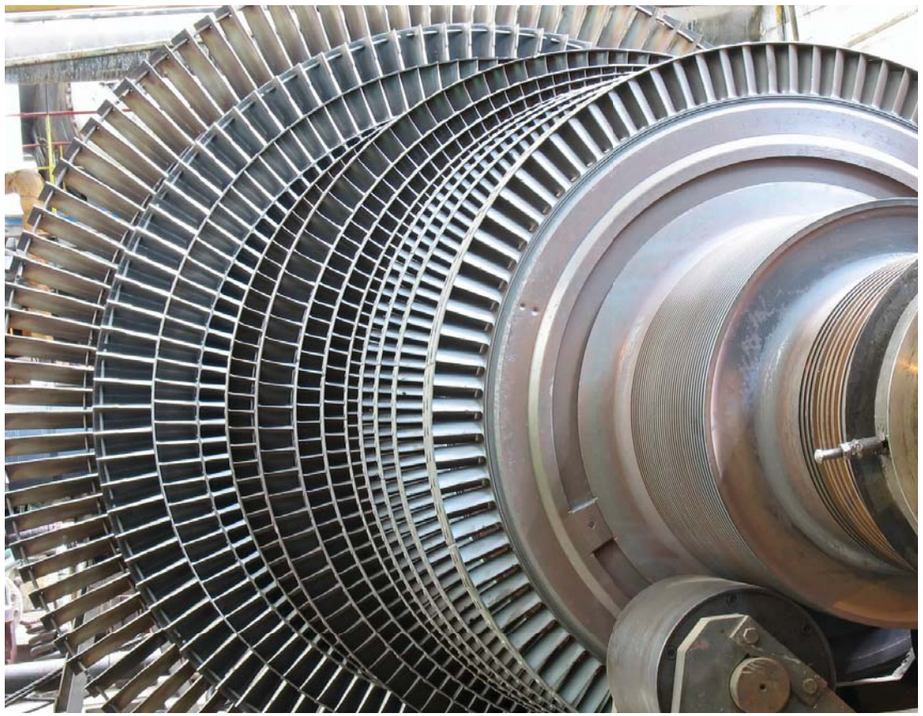
АВТОРЫ:

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

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

На любых работающих турбогенераторах время от времени возникают дефекты, связанные с эрозионными повреждениями валов роторов и подшипников. Считается, что основной причиной таких дефектов являются паразитные электрические напряжения на валах турбины и генератора. Такие напряжения создают роторные токи, протекающие между деталями и узлами турбоагрегата, вызывая при этом их электроэрозионный износ.

Ключевые слова: турбогенераторы; паровые турбины; сборочные единицы; электрическая эрозия; кавитационная эрозия; подшипниковые токи; преобразователи частоты; инверторы; широтно-импульсная модуляция; синфазные гармоники.



Паровая турбина в процессе ремонта

ВВЕДЕНИЕ

На турбоагрегатах ТЭС и АЭС во время эксплуатации систематически возникают дефекты, связанные с эрозионными повреждениями валов роторов и подшипников. Аналогичные проблемы возникают при эксплуатации мощных синхронных и асинхронных электродвигателей среднего напряжения, регулируемых преобразователями частоты. Природа таких дефектов, возникающих в турбоагрегатах электростанций и электродвигателях среднего напряжения, установленных, например, на ТЭС, нефтеперекачивающих станциях магистральных нефтепроводов, насосных станциях водоканалов, газоперекачивающих станциях с электрическими газоперекачивающими агрегатами (ЭГПА), в мощных турбокомпрессорах и т.п., несколько различается. В статье «Проблема электроэрозионных повреждений турбоагрегатов ТЭЦ, ГРЭС И АЭС» [1] при рассмотрении проблемы эрозионных повреждений подшипников отмечается, что их «причиной являются паразитные электрические напряжения на валах турбины и генератора... Данные напряжения создают роторные токи, протекающие между деталями и узлами турбоагрегата, вызывая при этом их электроэрозионный износ. Анализ повреждений и дефектов при авариях позволил выработать основные мероприятия по защите турбоагрегатов от электроэрозии... Как показывает практика, эта проблема для эксплуатируемого энергетического оборудования сохраняет свою актуальность и до настоящего времени. Это касается турбин, генераторов выпуска не только второй половины XX века, но и выпуска после 2000 года». В фундаментальной монографии [2], посвященной мониторингу вращающихся электрических машин и обобщающей практически 30-летние исследования проблем, связанных с различными дефектами турбо- и гидрогенераторов, синхронных и асинхронных машин, также отмечается, что вращающиеся элементы подшипников весьма восприимчивы к воздействиям напряжений на валах машин, приводящим к их изъязвлению, точечной эрозии и питтингу подшипников (разделы 2.84, 2.85 указанной монографии). В ряде случаев, например, у мощных синхронных генераторов, значение подшипниковых токов может достигать 50–600 А. В монографии также на основе анализа статистики за 26 лет, характеризующей распределение неисправностей по узлам электродвигателей среднего напряжения, сделан вывод, что уровень повреждений подшипников достигает 41%. Очевидно, что, несмотря на все разработанные и внедренные мероприятия по защите турбоагрегатов от электроэрозиии, массовое оснащение их аппаратурой по шунтированию роторных токов, повреждения подшипников и других сборочных единиц турбин и генераторов возникают достаточно часто. Это позволяет утверждать, что причина повреждений главным образом турбогенераторов заключается не только в действии электрических разрядов, приводящих к электроэрозии. Рассмотрение целого ряда публикаций по эксплуатации и ремонту уплотнений вала и опорных подшипников турбин и турбогенераторов показало, что в них практически отсутствует анализ конкретных форм каверн, возникающих из-за изъязвлений вала и подшипников, доказывающий электроэрозионную природу их возникновения. В интернете был выложен ряд публикаций (см., например, [4–6]), в которых дан детальный анализ повреждений вкладышей двигателей судовых механизмов, автомобильных дизельных двигателей, насосов и др. без привлечения «теории электроэрозии». Так, в статье «Дефекты подшипников. Оценка их технического состояния» [3] показано, что в судовых механизмах все повреждения вкладышей подшипников можно условно разделить на следующие группы: износ, усталость, коррозия, риски и царапины, эрозия и кавитация, фреттинг-коррозия и питтинг, полное разрушение. Дана подробная конкретизация повреждений: выработка баббитовой расточки, механический износ баббита, отслоение баббитовой заливки вкладыша, выкрашивание баббитовой заливки вкладыша, электроэрозионный износ расточки баббита (только у вкладышей электрогенераторных установок), повреждение опорных подшипников с частичным расплавлением баббитовой заливки или ее полным расплавлением, повреждение расточек под вкладышами. В этой статье также показано, что в авиационных механизмах большинство отказов подшипников скольжения могут быть вызваны одним из следующих факторов: прямой (металлический) контакт между подшипником и ва-

ПРОГРЕССИРУЮЩАЯ КАВИТАЦИОННАЯ ЭРОЗИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ШАТУННОГО ПОДШИПНИКА ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗЪЕМА [3]

Рис. 1

лом, усталостное разрушение материала подшипника, геометрические дефекты, кавитационная эрозия, коррозия материала подшипника [3]. В подробной таблице диагностики [4] приведены наиболее часто возникающие повреждения подшипников: усталостное выкрашивание (дорожка качения, поверхность ролика), отслаивание (наружная поверхность подшипника — контакт качения, дорожка качения, поверхность ролика), образование задиров (торцевая поверхность края ролика, направляющая поверхность сепаратора, поверхность ячеек сепаратора), размазывание (дорожка качения, поверхность ролика), сколы (воротничок дорожки качения, ролики), трещины (дорожки качения, элементы качения, направляющая поверхность сепаратора — термические трещины), выщербливание (многочисленные мелкие выбоины на дорожке качения), поверхностное выкрашивание (дорожка качения, поверхность ролика), износ, истирание, коррозия при воздействии электрических токов (электрический ток, проходящий через дорожку качения, поверхность ролика), ржавчина и коррозия, дефекты монтажа. В статье «Как избежать отказов в работе подшипников скольжения» [5] отмечается, что в авиационных механизмах большинство отказов подшипников скольжения могут быть вызваны одним из следующих факторов: прямой (металлический) контакт между подшипником и валом, усталостное разрушение материала подшипника, геометрические дефекты, кавитационная эрозия, коррозия материала подшипника. Анализ причин, вызывавших в течение длительного периода времени аварии моторных подшипников в двигателях внутреннего сгорания, приводится в статье «Из опыта пробега подшипников скольжения ДВС на расстояние в миллион миль и более» [6]. Подробно рассмотренные в этой публикации причины повреждений сводятся к утечке охлаждающей жидкости (антифриза), «миграции» олова из покровного слоя, потере подшипником покровного слоя из-за незначительных утечек охлаждающей жидкости, отделению медно-свинцового сплава вкладыша от стальной основы, кавитационным повреждениям, абразивному износу покровного слоя, разрыву масляного потока. В цитируемой статье приведена фотография прогрессирующей кавитационной эрозии алюминиевого шатунного подшипника двигателя внутреннего сгорания вблизи поверхности разъема, внешне напоминающая электрическую эрозию (рис. 1). Для сравнения на рис. 2 показано повреждение вкладыша подшипника турбины К-800-240-5.

Анализ указанных выше публикаций подтверждает вывод о том, что причин неэлектрической природы повреждения подшипников достаточно много. Поэтому, например, на электростанциях при обнаружении повреждения, внешне похожего на электроэрозию (а зачастую и не похожего), эксплуатационный персонал, как правило, испытывает затруднения в определении действительной причины повреждения, что препятствует принятию действенных мер по его предупреждению.

В статье «Повышение надежности заземления валов турбоагрегатов» [7] рассмотрены результаты обследования в период 1991–1996 гг. около 700 турбоагрегатов мощностью от 60 МВт и выше. Электроэрозионные повреждения валов и подшипников были обнаружены на 40% из них. К сожалению, ссылка на источник приводимой в этой статье информации отсутствует. Вместе с тем, как отмечается в книге «Повреждения подшипников паровых турбин» [8], при нормальной работе турбоагрегатов происходит сравнительно малое число повреждений подшипников. К повреждениям приводят случаи аварийного прекращения подачи масла, нерасчетного нагружения опор, чрезмерных перекосов между шейкой вала и рабочей поверхностью подшипника, повышенной вибрации валопровода. Потеря работоспособности подшипников возникает, в первую очередь, во время пусков и остановов паровой турбины, когда при недостаточной толщине масляной пленки вероятны многие виды износа баббитовой заливки: натиры, задиры, натяги, отслоение, выкрашивание, подплавление и др. Недопустимые отклонения качества масла от нормируемого могут вызывать: повышение температуры баббита (при аэрации масла); физический (абразивный) износ сопряженных поверхностей трения (при загрязнении масла механическими примесями); задир в режимах граничной смазки (при обводнении масла). К повреждениям баббита приводят отклонения в химическом составе антифрикционного материала, нарушения режима его заливки и охлаждения. В процессе эксплуатации имеют место и электроэрозионные повреждения элементов турбоустановки. В указанной выше работе также сообщается, что анализ повреждений, выполненный за 25-летний период эксплуатации более чем 800 паротурбинных установок мощностью 100–800 МВт разных типов и разных заводов-изготовителей, показал, что у отдельных типов турбин уровень повреждений подшипников довольно высокий и составляет до 25% всех повреждений. При этом время вынужденного восстановительного ремонта турбин по этой причине может достигать 30%. В настоящее время при сложившейся практике установления причин повреждений опор паровых турбин (как правило, без участия специалистов сторонних организаций) особую значимость приобретает систематизация и описание характерных повреждений подшипников.

ПОВРЕЖДЕНИЕ ВКЛАДЫША ПОДШИПНИКА ТУРБИНЫ К-800-240-5 КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИЕЙ

Рис. 2

В работе «Турбогенераторы. Аварии, инциденты» [9] приведен статистический анализа 576 актов расследования аварий и инцидентов в работе турбогенераторов за период с 2001 по 2005 г., на основании которого показано, что на долю уплотняющих и опорных подшипников пришлось 111 событий, что составило 19,3% от общего числа повреждений. При этом ни в одном из 111 актов не было указано, что причиной аварии или инцидента явились электроэрозионные повреждения вкладышей подшипников, шеек роторов, зубчатых муфт, деталей узлов регулирования.

При визуальном рассмотрении мест повреждения вкладышей и анализе цифровых фотографий, выполненных с большим разрешением, с достаточной степенью вероятности было установлено, что причинами нарушений может быть не только электрическая, но и кавитационная эрозия. Следует отметить, что эрозионное и кавитационное изнашивание подшипников часто возникают совместно, что вызывает значительные затруднения при определении, какой из процессов привел к разрушению поверхности вкладыша подшипника.

Коммутационные процессы в преобразователе частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), сопровождающиеся высокочастотными гармониками в напряжении и токе при регулировании скорости вращения мощных электродвигателей переменного тока, усугубляют проблему ускоренного износа вала и подшипников токов, могут вызвать волновые процессы и импульсные перенапряжения в системе «ПЧ — соединительный кабель — электродвигатель», воздействующие на изоляцию обмотки статора и приводящие к появлению «паразитных» (подшипниковых) токов [10, 12, 15–17]. Под воздействием высокочастотного тока увеличивается интенсивность передачи металла от расс подшипников к смазке. При этом на поверхности расс возникает эрозия в виде кратеров (каверн), приводящих к перегреву подшипников и их повышенному механическому износу. В различных источниках приводятся основные причины появления паразитных токов в валу и подшипниках мощных электродвигателей переменного тока, регулируемых от ПЧ: асимметрия магнитопровода, создающая условия возникновения низкочастотного тока через подшипники; накопление электростатического заряда на валу, обусловленного приводным механизмом; напряжения синфазных гармоник, генерируемых ПЧ [12–17]. Следует отметить, что в системе «питающая сеть — ПЧ — электродвигатель» под действием генерируемых ПЧ синфазных гармоник возникают высокочастотные перенапряжения относительно «земли», являющиеся опасными для изоляции электрооборудования [12, 15, 16]. Высокочастотные токи, вызываемые этими гармониками, протекают по заземлениям, броне кабелей, металлическим частям конструкции преобразовательной схемы и могут наводить напряжения на подшипниках, что особенно характерно для ПЧ с автономными инверторами напряжения на полупроводниковых ключах (силовых биполярных транзисторах — IGBT) с высокочастотной ШИМ.

В целом сложилась парадоксальная ситуация: разработаны и предлагаются к применению большое число методик и аппаратуры по защите турбоагрегатов и крупных электродвигателей среднего напряжения от электроэрозионных повреждений, в то же время отсутствуют

рекомендации по предупреждению кавитационной эрозии в подшипниках турбоагрегатов. При этом, как показывает практика, для установления действительной причины повреждений часто приходится применять метод последовательного исключения отдельных причин.

Настоящая статья описывает основные причины и признаки, позволяющие отличить электроэрозию от кавитационной эрозии. Кроме этого, в материале представлен анализ влияния преобразователей частоты на подшипниковые токи при регулировании мощных двигателей переменного тока.

КАВИТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦАХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Признаками кавитационной эрозии, судя по опыту определения причин характерных повреждений, могут быть:

- на баббитовой заливке вкладышей — хаотичное расположение каверн, изъязвлений и точечных углублений с острыми краями, обширная площадь повреждения;
- на шейках валов — наличие изъязвлений и точечных углублений.

Не являются признаками, свидетельствующими об электроискровом повреждении, обширное выплавление баббита вкладышей, хрупкий характер разрушения баббита и сетка трещин на нем.

Как известно, кавитация является следствием нарушения сплошности потока жидкости в местах уменьшения давления ниже критического значения, которое приблизительно соответствует давлению насыщенного пара этой жидкости при данной температуре. В результате образуется множество пузырьков, наполненных парами жидкости и воздухом. Возникновению кавитационных пузырьков способствует повышенная температура жидкости. Эти пузырьки, двигаясь с потоком жидкости и попадая в область пониженного давления, расширяются, поскольку давление содержащегося в них воздуха и пара становится больше, чем суммарное давление, вызванное силами поверхностного натяжения и гидростатического давления. Из-за этого на участке потока с пониженным давлением (например, в трубе за местным сужением) создается четко очерченная «кавитационная зона», заполненная движущимися пузырьками. После перехода в зону повышенного давления рост пузырька прекращается, и он начинает сжиматься. Сжатие пузырька происходит с большой скоростью, в результате чего образуется микроскопическая струя, несущая огромную (для размеров пузырька) энергию. Соприкосновение «облака» пузырьков с твердой поверхностью вкладыша или вала вызывает ее разрушение. Поверхность металла становится изъязвленной.

Время увеличения и схлопывания кавитационных пузырьков составляет порядка 10^{-6} с, при этом давление внутри них может достигать значения 100 МПа и более, а температура — 10 000 К [18]. В подшипниках это вызывает распад молекул масла и образование продуктов разложения. Масштабы такого явления могут быть разными — от точечной, едва различимой, поверхностной эрозии до катастрофического разрушения оборудования.

На рис. 3 в качестве примера показано повреждение кавитационной эрозией стенки канала водяного охлаждения медного витка катушки обмотки ротора турбогенератора типа ТГВ-500-2 на участке уменьшения живого сечения натекшим припоем в месте пайки полувитков встык. Повреждение было обнаружено во время пусковых операций по окончании заводского ремонта и установки ротора в статор, поскольку сопротивление изоляции обмотки ротора внезапно снизилось до нуля. После демонтажа торцевых щитов, вывода ротора из статора и снятия бандажного кольца осмотр лобовых частей катушки № 7 показал, что нарушена герметичность витка № 2. После демонтажа распорок лобовых частей, разборки радиального узла водоподвода к катушке и расклиновки пазов катушек № 6 и 7 витки катушки № 7 были подняты. При поднятии витка № 2 он сломался (разъединился) в месте стыковой пайки. На рис. 3 видна глубоко изъязвленная поверхность канала витка и проросшая трещина.

КАВИТАЦИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ КАНАЛА ВИТКА В МЕСТЕ СУЖЕНИЯ, ВЫЗВАННОГО НАПЛЫВАМИ ПРИПОЯ

Рис. 3

«РТСОФТ»: 25 ЛЕТ ПРОГРЕССА И ИННОВАЦИЙ

На правах рекламы

RTSoft
средства и системы автоматизации

В этом году АО «РТСофт» отмечает 25-летний юбилей. В активе компании — достойная история длиною в четверть века, бесценный опыт работы, тысячи успешных проектов, лидирующие позиции на рынке промышленной автоматизации, программного обеспечения и встраиваемых компьютерных технологий и мощный инженерный и научно-технический потенциал. «РТСофт» постоянно развивается, расширяя сферу профессиональной деятельности, осваивая новые инновационные направления, и уверенно смотрит в будущее. Редакция журнала «Энергия единой сети» поздравляет юбиляра и представляет его читателям.

Девиз компании — «От лучших отечественных инженерных решений к конкурентоспособной стране» — на протяжении всех 25 лет остается неизменным. Основатель и бессменный руководитель компании Ольга Викторовна Синенко, рассказывая о своем детище, подчеркивает, что «РТСофт» всегда был силен не только инженерно-производственным, но и научно-техническим потенциалом, позволяющим концентрировать усилия на инновациях.

А для этого нужно иметь серьезную научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую базу и профессиональную команду. И у компании все это есть. «РТСофт» гордится командой талантливых экспертов и специалистов, способных превратить практически любой креативный замысел в реальный продукт или проект. В десяти инженерных центрах и филиалах по всей стране трудятся свыше 500 сотрудников. Большинство из них — программисты разного уровня, которые создают встраиваемое программное обеспечение, работают с системами SCADA, разрабатывают аналитические приложения. Инженерный центр разработки электронной аппаратуры и собственное производство в подмосковном наукограде Черноголовке оснащены самым передовым оборудованием. Компания накопила солидный проектный опыт в электроэнергетике, нефтегазовом секторе, металлургии, машиностроении, транспорте, ВПК. За 25 лет «РТСофт» успешно выполнил более 9 000 проектов. Так, в «большой» энергетике, пожалуй, нет ни одной организации, с которой «РТСофт» не работал бы по тем или иным направлениям. Это АО «СО ЕЭС», ПАО «ФСК ЕЭС», ПАО «Россети», ПАО «РусГидро» и другие компании.

Опираясь на эту мощную базу, а также на эффективную кооперацию с отечественными и зарубежными разработчиками и производителями и ориентируясь на лучшие мировые тенденции, «РТСофт» создает продукты и решения, которые не только успешно конкурируют в России, но и выходят на международные рынки.

В продолжение темы научно-технической деятельности стоит отметить, что «РТСофт» является базовой организацией Подкомитета D2 «Информационные системы и телекоммуникации» РНК СИГРЭ. Буквально месяц назад в Москве состоялось событие международного уровня — Коллоквиум CS D2 CIGRE, организованный АО «РТСофт» при поддержке ПАО «ФСК ЕЭС». Это мероприятие позволило обменяться опытом с зарубежными коллегами, получить актуальные исследовательские и технические материалы в сфере энергетики.

«РТСофт» всегда готов к решению широкого спектра задач. В ближайших планах компании — завершение ряда пилотных проектов по управлению энергозатратами промпредприятий и внедрению интеллектуальной распределенной энергетики, поставка промышленных серверов и серверов точного времени для энергетических предприятий, открытие на базе учебного центра интерактивной инженерной лаборатории Industry/Energy 4.0. И конечно, укрепление сотрудничества с ведущими научными и проектными организациями и университетами страны для поддержки отечественной инженерной школы и развития наиболее перспективных технологий.

АО «РТСофт»
www.rtsoft.ru
rtsoft@rtsoft.ru

ТРОЙНИК ВИТКА КАТУШКИ ОБМОТКИ РОТОРА С ВОДЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ. СТАЛЬНАЯ ТРУБКА ОБРЕЗАНА

Рис. 4

ПОВЕРХНОСТЬ КАНАЛА ТРОЙНИКА, ПОВРЕЖДЕННАЯ КАВИТАЦИЕЙ. ДИСТИЛЛЯТ В КАНАЛ ВИТКА ПОСТУПАЛ ИЗ ТРУБКИ

Рис. 5

На рис. 4, 5 показано повреждение кавитационной эрозией стенки тройника, через который поступал дистиллят в витки одной из катушек обмотки ротора турбогенератора типа ТВМ-500-2 для охлаждения. Повреждение детали обнаружилось во время расследования причины аварии при лабораторном исследовании после того, как оно была распилена. Толщина стенки составила 4 мм. Глубина изъязвления в одном месте достигала 3,5 мм. Кавитационные пузырьки возникали в зоне расширения струи воды, выходящей из стальной трубки, и резкого изменения ее направления, схлопывание происходило на участке сужения канала тройника.

Попадание в масло воды ведет к снижению его вязкости и значительному увеличению скорости кавитационного изнашивания, что влечет за собой рост зазоров в подшипнике за счет износа сопряженных поверхностей шейки и вкладыша вследствие увеличения шероховатости, вызванной кавитационным изнашиванием.

При недоброкачественной сборке уплотнения вала масло проникает внутрь корпуса турбогенератора в капельной форме. Если оно обводнено, то пузырьки воздуха, находящиеся в каплях воды, при ударе о набегающую кромку пера стальной лопатки вентилятора ротора схлопываются, что приводит к кавитационной эрозии. Кромка пера приобретает характерную зазубренную форму. Аналогичное повреждение наблюдается и на лопатках роторов турбин. Например, во время капитального ремонта турбогенератора типа ТВФ-60-2 была обнаружена такая эрозия лопаток вентилятора на длине до 100 мм на глубину до 30 мм (рис. 6). Это указывает на весьма длительную работу уплотняющих подшипников с увлажненным маслом.

Однако все перечисленные повреждения возникают достаточно редко. Наиболее же часто кавитационная эрозия повреждает вкладыши подшипников турбогенераторов и турбин.

В подшипниках скольжения турбогенераторов давление масла уменьшается в местах быстро разбегающихся трущихся поверхностей, разделенных масляной пленкой, в местах канавок и сверлений, а также при вибрации шейки вала в пределах зазора подшипника. Это приводит к выделению из масла растворенного воздуха в виде пузырьков. Двигаясь вместе с маслом, пузырьки попадают в зоны повышенного давления и схлопываются, повреждая вкладыши и валы роторов кавитационной эрозией.

Применительно к турбогенераторам явление кавитационной эрозии до настоящего времени не исследовалось. Все повреждения подшипников турбоагрегатов объяснялись электрической эрозией, поэтому не всегда назначались

правильные мероприятия по устранению их причин.

Так, например, на одной из ТЭЦ в 2002 г. во время ремонта было обнаружено повреждение рабочего колеса и уплотнительного бронзового кольца рабочей камеры главного маслонасоса турбины Т-25-90-4ПР1. Во время ремонта были установлены новое колесо и новое кольцо. Характер повреждения сборочных единиц — каверны. Но, несмотря на проведенный ремонт, в 2003 г. произошел отказ насоса уже в работе из-за возникновения течи масла в местах повреждения корпуса насоса и кольца. При визуальном осмотре сборочных единиц причиной их повреждения персонал ТЭЦ признал электроэрозию, поскольку внешне это было похоже на плавление из-за протекания электрического тока. Поэтому были предприняты безуспешные длительные поиски второй точки замыкания в турбогенераторе. Во время внепланового ремонта произвели проточку корпуса и насоса, установили новое кольцо в рабочую камеру. Но вторую точку замыкания так и не нашли, и поврежденное кольцо (материал кольца — бронза) было передано на исследование одному из авторов (Ю.Н. Самородову). Микроскопический анализ поврежденного участка кольца (рис. 7, 8) показал, что из-за ослабления прижатия крышки к корпусу возникло местное истирание соприкасающихся поверхностей кольца и корпуса. Через образовавшуюся щель микронных размеров стало просачиваться масло, давление которого в рабочей камере составляло 1,2 МПа. В щели из-за возрастания давления происходило схлопывание пузырьков воздуха, содержавшихся в масле. В результате возникла кавитационная эрозия стенок щели. Наибольшая глубина овальной каверны на кольце составила 2,2 мм, ширина — до 1 мм; руслообразной — соответственно 0,1 мм и 0,5 мм. Следы электрической эрозии на кольце отсутствовали, поскольку между корпусом и кольцом и между крышкой и кольцом электрическое напряжение отсутствовало.

Аналогичные кавитационные каверны были обнаружены на колодке подшипника турбогенератора ТВФ-110-2Е (рис. 9). Но поскольку подшипник был не изолирован, то персонал посчитал причиной повреждения электроэрозию. Однако на фотографии видны четкие продолговатые каверны, образованные кавитационной эрозией. Для того чтобы убедиться, что каверны образовались в результате кавитационной эрозии, достаточно сравнить рис. 9 с рис. 8. Поэтому заключение персонала ТЭЦ о якобы обнаруженной электроэрозии было неверным.

В 2014 г. на колодках сегментного упорного подшипника № 1 (рис. 10) турбины Т60/70-6,8/0,12 эксплуатационный персонал электростанции

КАВИТАЦИОННАЯ ЭРОЗИЯ КРОМКИ ПЕРА ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА

Рис. 6

УПЛОТНЯЮЩЕЕ БРОНЗОВОЕ КОЛЬЦО. СТРЕЛКОЙ ПОКАЗАН УЧАСТОК, НАИБОЛЕЕ ПОВРЕЖДЕННЫЙ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИЕЙ

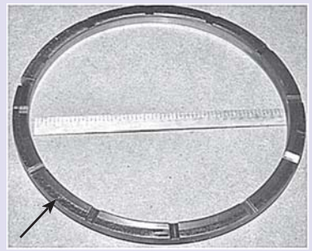


Рис. 7

КАВИТАЦИОННЫЕ КАВЕРНЫ. ЦЕНА ДЕЛЕНИЯ ШКАЛЫ 0,2 ММ

Рис. 8

КАВИТАЦИОННЫЕ КАВЕРНЫ НА КОЛОДКЕ УПЛОТНЯЮЩЕГО НЕИЗОЛИРОВАННОГО ПОДШИПНИКА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ТВФ-110-2Е

Рис. 9

КАВЕРНЫ НА СЕГМЕНТЕ УПОРНОГО ПОДШИПНИКА № 1 ТУРБИНЫ

Рис. 10

обнаружил несколько мелких каверн различной глубины и округлой формы. При этом персоналом было высказано предположение, что эти повреждения вызваны длительным действием электрических разрядов сквозь масляный клин. Причиной посчитали наличие на валу турбины статического электричества или наведенных импульсов от тиристорной системы возбуждения турбогенератора. Специализированная организация, приглашенная для определения причины возникновения электрической эрозии, рекомендовала:

- разработать и установить на валу турбины новый токосъем с использованием четырех заземляющих щеток типа 611 Ом;
- после установки щеток и включения турбоагрегата в работу произвести обследование электромагнитного состояния турбоагрегата;
- во время ближайшего капремонта произвести измерение остаточной намагниченности узлов и деталей турбоагрегата и при необходимости произвести размагничивание.

Для исследования причины этого повреждения были использованы цифровые фотографии, предоставленные персоналом электростанции. В результате было установлено, что какие-либо следы электрических разрядов отсутствуют, а повреждения возникли в результате кавитационной эрозии и не имеют каких-либо следов действия искровых или дуговых разрядов. Особенностью образовавшихся при повреждении каверн является четкий контур отверстий и отсутствие следов какого-либо оплавления. В идеальном случае кавитационная эрозия должна возникать на участке минимальной толщины масляного клина на нижнем вкладыше. В реальных условиях она возникает в самых разных зонах нижнего и верхнего вкладышей в результате следующих причин, уменьшающих толщину масляного клина [19]:

- потеря устойчивости ротора и переход в режим автоколебаний в радиальном направлении на масляном клине относительно точки равновесия, как правило, в случае значительного уменьшения давления вала ротора на подшипник;
- увеличение зазоров в подшипнике из-за износа в процессе работы, приводящее к увеличению вертикальных вибраций, более значительных по сравнению с горизонтальными;
- возникновение небаланса или расцентровки, приводящих к обкатыванию ротора по окружности подшипника, при этом ротор может приподниматься и прижиматься к боковым поверхностям вкладышей и даже к верхней точке верхнего вкладыша подшипника;
- возникновение вибраций масляного клина, как правило, в случае, если имеется значительное отклонение от норм одного из следующих основных параметров: пониженное значение нагрузки от ротора на подшипник; в агрегате, как минимум, присутствует еще одна возмущающая вибрации сила, возникшая не как результат проблем подшипника, но способная возбудить колебания ротора в подшипнике; произошло ухудшение рабочих параметров масла (вязкость, температура, давление, наличие посторонних примесей);
- неправильная установка баббитовых вкладышей, их перекос или чрезмерная подвижность внутри подшипникового стояка;
- возникновение эллипсности шейки вала из-за неравномерного износа.

КАВИТАЦИОННАЯ ЭРОЗИЯ ВЕРХНЕГО ВКЛАДЫША ПОДШИПНИКА № 11 ТУРБИНЫ К-800-240-5

Рис. 11

Именно вибрацией вала в вертикальном направлении можно объяснить наблюдаемые повреждения кавитационной эрозией верхнего вкладыша подшипника № 11 турбины К-800-240-5 (рис. 11). Для сравнения на рис. 18 показана кавитационная эрозия нижнего вкладыша данного подшипника, на котором видно, что основное повреждение расположено на участке минимальной рабочей толщины масляного клина.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МАСЛЯНОМ КЛИНЕ

Поскольку картины повреждения вкладышей и валов кавитационной эрозией и электрической эрозией в ряде случаев трудно отличимы друг от друга, то представляется целесообразным рассмотреть основные электрические процессы в масляном клине. При нарушении контакта заземляющей щетки с валом турбоагрегата на валу наводятся следующие виды напряжения относительно земли, которые оказываются приложенными к масляному клину:

- постоянное напряжение, обусловленное электростатическим эффектом, которое возникает главным образом в результате трения сухого пара о лопатки турбины. При зарядке ротора турбины паром на валу роторов турбоагрегата появляется высокое напряжение [20]. Его значение зависит от состояния масляной пленки, через которую заряд стекает в землю. Между валом и подшипниками иногда наблюдается проскакивание искры. Измерение сопротивления изоляции подшипника показывает ее полную исправность. Напряжение же между валом и корпусом машины, если измерить его магнитоэлектрическим вольтметром с большим внутренним сопротивлением (200 кОм и больше), оказывается больше напряжения между кольцами ротора. Пики напряжения, которое может сообщить подобный заряд ротору, зависят от сопротивления изоляции масляной пленки подшипников и доходят до 800 В и выше [21]. Источник тока весьма маломощен, поэтому токи стекания на землю статических зарядов не превышают 3–5 мА, что не приводит к повреждению поверхностей скольжения подшипников [22, 23];
- постоянное напряжение, обусловленное эффектом униполярной индукции, которое возникает при вращении проводящих (как правило, ферромагнитных) тел, обладающих намагниченностью, либо помещенных во внешнее магнитное поле. Результаты измерений, проведенных на генераторах 200 МВт, показали, что униполярная ЭДС этих машин в нормальных условиях не превышает 35 мВ, т.е. весьма мала [23];
- переменное напряжение, обусловленное наводками от системы возбуждения за счет неравенства емкостей положительного и отрицательного полюсов по отношению к земле. Напряжения наводок составляют несколько десятков вольт при токе через емкости менее одного ампера [22]. Как правило, наибольший уровень такого напряжения наводится от системы возбуждения у генераторов с тиристорной системой возбуждения;
- переменное напряжение пониженной частоты, наложенное на обмотку ротора устройством защиты от замыкания на землю в одной точке (например, напряжение, накладываемое устройством типа КЗР-3, не превышает

ЭЛЕКТРОДУГОВОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ ВКЛАДЫША УПЛОТНЯЮЩЕГО ПОДШИПНИКА ПРОТЯЖЕННОСТЬЮ 35 ММ

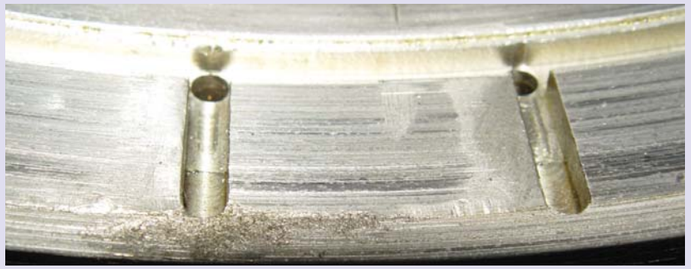


Рис. 12

100 В переменного тока частотой 25 Гц);

– переменное напряжение, обусловленное ЭДС, возникающей в неразомкнутом контуре «вал — подшипники — фундамент».

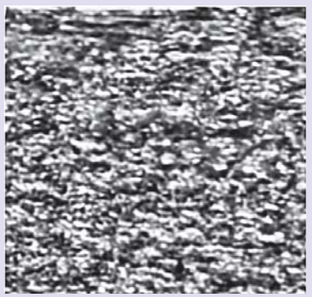
Основную опасность представляет ЭДС, индуктируемая в контуре «вал — подшипники — фундамент» из-за сцепления с контуром переменного магнитного потока основной частоты, возникающего из-за несимметрии магнитного сопротивления двух параллельных ветвей основного магнитного потока машины. Несимметрия появляется, главным образом, из-за несоосности ротора и статора. Если контур «вал — подшипники — фундамент» не разомкнут, т.е. изоляция конца вала со стороны возбудителя (контактных колец) неисправна, то даже при сравнительно небольших значениях ЭДС (десятки вольт), наводимых в этом контуре при нормальном режиме, возможно прохождение очень больших токов (нескольких сотен и тысяч ампер). Такие токи, несомненно, вызовут повреждения подшипников, червячных пар и других металлических частей агрегата, соприкасающихся с валом.

Из приведенного краткого обзора видно, что ни электростатическая, ни униполярная ЭДС, ни наводки не способны вызвать существенную электроэрозию вкладышей и валов турбоагрегата. Лишь ЭДС, индуктируемая в контуре «вал — подшипники — фундамент», может вызвать электроэрозию, но только при условии значительного снижения электрической прочности масляного клина либо его шунтирования (загрязнением подстуловой изоляции, металлической оплеткой кабеля датчика вибрации т.п.).

Масляный клин — это жидкий диэлектрик, разделяющий два электрода: неподвижный и вращающийся в двухполюсных машинах с частотой 50 об/с (в четырехполюсных машинах — с частотой 25 об/с). Диэлектрические свойства турбинного масла могут быть охарактеризованы пробивным напряжением, которое в каждом конкретном случае должно быть определено в стандартном разряднике. Но на практике такое испытание обычно не проводят. Оценочные измерения сопротивления и пробивного напряжения чистого сухого турбинного масла были ранее выполнены одним из авторов и дали следующие результаты: электрическая прочность в среднем составила 26 кВ/см, удельное объемное сопротивление при 1000 В — 5,2·1012 Ом·м. Как и ожидалось, электрические свойства турбинного масла по сравнению с трансформаторным оказались хуже.

Механизм пробоя диэлектрических жидкостей включает в себя про-цессы ударной ионизации электронами и холодной эмиссии электронов с катода. Электрон, двигаясь в масле, т.е. в более плотной среде по сравнению с газовой, имеет меньшую длину свободного пробега, а потому для приобретения энергии, достаточной для ионизации и последующего пробоя,

СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ ВКЛАДЫША, ПОВРЕЖДЕННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ



Направление скольжения поверхности вала ротора относительно баббитовой заливки — горизонтальное. Особенность повреждения — протяженная область расплавления металла. Поскольку второй электрод (шейка вала) вращался, то на баббите и шейке вала видны цепочки овальных точечных дуговых оплавлений.

Рис. 13

НАПРЯЖЕНИЕ НА СТАТОРЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ 2500 кВт, 4160 В И НА ЕГО НЕЙТРАЛИ ОТНОСИТЕЛЬНО «ЗЕМЛИ» ПРИ НОМИНАЛЬНЫХ НАГРУЗКЕ И СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

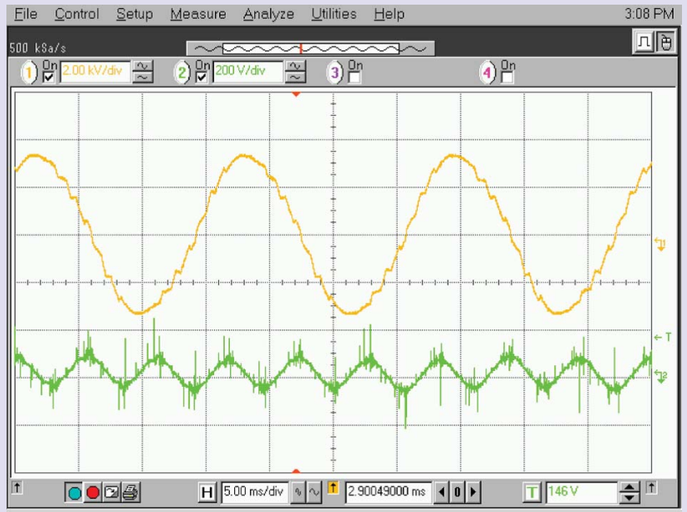


Рис. 14

он должен разгоняться при больших напряженно-стях электрического поля. В масле в сравнительно однородном поле наступает пробой в виде единичной искры, перекрывающей весь промежуток. Пробой в виде часто следующих друг за другом разрядов или в виде дуги устанавливается только при напряжении, значительно превосходящем напряжение первичной искры. Если пробой происходит под действием короткого импульса, то вероятность перехода искры в устойчивую дугу мала, и масло в промежутке между электродами частично восстанавливает первоначальную электрическую прочность. Пробой диэлектрика возникает в точке наибольшей напряженности электрического поля. Такой точкой может быть минимальная толщина клина, наличие концентратора напряженности (неснятая фаска отверстия, острая кромка шлица винта/болта, заусенец, грубые риски на шейке вала и т.п.). Именно в таких местах с каждым оборотом вала будет возникать искровой разряд. При искровом разряде термические воздействия ограничены микроскопическими участками поверхности, а площадь разрушения анода (вкладыша или вала) находится в пределах 0,05–0,5 мм^2 при глубине поражения 0,005–0,1 мм. В месте поражения образуется микроскопическая впадина с оплавленными краями. Следует подчеркнуть, что повторно искровые разряды уже больше не ударяют внутрь впадины, но могут концентрироваться на ее краях.

Дуговой электрический разряд сопровождается интенсивными термическими воздействиями, частично расплавляет вал и вкладыш на сравнительно большой площади и при нарушении подстуловой изоляции является основным разрушительным фактором.

Степень повреждения зависит от физических свойств материала электрода (теплопроводности, теплоемкости, температуры плавления). Сталь вала ротора разрушается значительно меньше, чем баббит вкладыша, за счет большего коэффициента теплопроводности.

При любом виде электрического разряда через масляный клин металл повреждается в результате термического действия электрического тока. Признаком электрической эрозии являются (если будет установлено нарушение заземления вала) характерное дуговое оплавление либо вытянутая в направлении вращения вала ротора каверна от искрового разряда.

Рассмотрим конкретное дуговое повреждение вала и вкладыша в турбогенераторе типа ТВФ-100-2, возникшее во время междуфазного замыкания в обмотке статора в лобовых частях. Под действием ударного тока короткого замыкания с одной из лобовых частей была сорвана корпусная изоляция, распушены и разорваны элементарные проводники. Некоторые из них коснулись вращавшегося бандажного кольца ротора на стороне турбины, где опорный подшипник не изолирован. В результате произошло дуговое повреждение вкладыша (рис. 12, 13) и шейки вала (рис. 14).

При исследовании процесса электрического пробоя оксидной пленки (несовершенного диэлектрика) минусового контактного кольца ротора турбогенератора было установлено, что проплавляемые в пленке каналы имеют вытянутую форму в направлении вращения кольца. Электрический пробой твердых диэлектриков происходит весьма быстро за время порядка 10^{-7} — 10^{-8} с. Как показал расчет, за указанное время пробоя в оксидной пленке кольца, например, турбогенератора ТВФ-110-2Е, может быть проплавлена микроскопическая канавка длиной 0,5 ÷ 5,0 мкм в направлении вращения. Из вышеизложенного следует, что каверны от пробоя масляного клина на вращающемся валу, делающем 3000 оборотов в минуту, и на неподвижном вкладыше будут протяженными, но не круглыми.

ПОДШИПНИКОВЫЕ ТОКИ И ЭРОЗИЯ ПОДШИПНИКОВ КРУПНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основной причиной прохождения электрического тока в подшипниках крупных электрических двигателей переменного тока является разность электрических потенциалов между наружным и внутренним кольцами подшипника, которая приводит к повреждению дорожек и тел качения, а также существенно ухудшает эксплуатационные характеристики подшипника. Обычно протекание электрического тока или возникновение электрического разряда в подшипнике происходит в зоне контакта тел качения с дорожками качения на внутреннем либо наружном кольце. Это, в свою очередь, вызывает точечное расплавление поверхности материала в месте прохождения электрического тока или возникновения электрической дуги в смазочной пленке, так называемые кратеры. В результате возникает питтинговая коррозия, перенос частиц материала и местные микроструктурные повреждения в результате теплового стресса [2, 11]. По крайней мере, в элементах подшипника возникает очень тонкий слой эродированной (изъеденной кратерами) поверхности, что делает ее чрезвычайно жесткой и склонной к растрескиванию. Кроме того, электрический разряд в смазочной пленке оказывает негативное воздействие на смазку. Базовое масло и присадки, содержащиеся в смазке, окисляются, о чем свидетельствует характерный черный цвет смазки. Преждевременное старение смазочного материала необратимо уничтожает его способность по формированию разделительной смазочной пленки между металлическими поверхностями. Поврежденные рабочие поверхности подшипника и потеря своих свойств смазкой приводят к быстрой потере работоспособности подшипника и к полному выходу его из строя.

Регулирование скорости вращения крупных электродвигателей среднего напряжения преобразователями частоты с высокочастотной ШИМ усугубляется явлением наведенного напряжения/тока вала из-за несбалансированной формы напряжения на выходе ПЧ и высокочастотных гармоник в спектре напряжения, подаваемого на электродвигатель. Трехфазное напряжение на выходе ПЧ, в отличие от чисто синусоидального напряжения, не сбалансировано.

ТИПИЧНАЯ ФОРМА НАПРЯЖЕНИЯ НА НЕЙТРАЛИ ДВИГАТЕЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНО «ЗЕМЛИ», РЕГУЛИРУЕМОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ACS 2000MV С ПЯТИУРОВНЕВЫМ ШИМ-ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

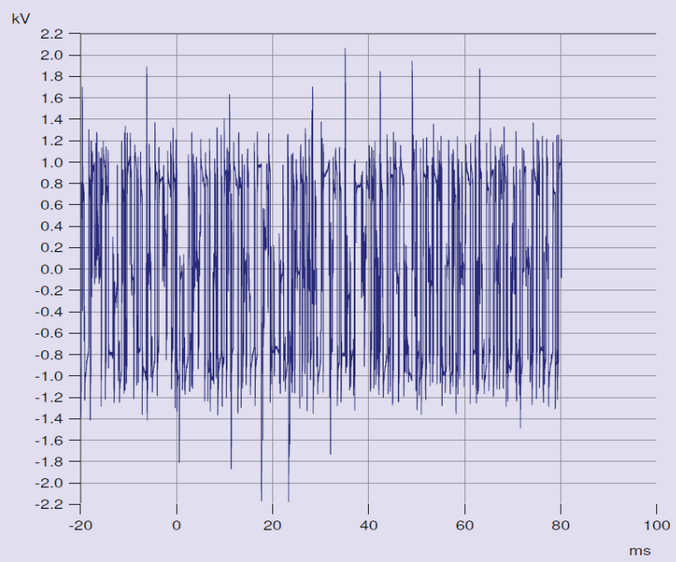
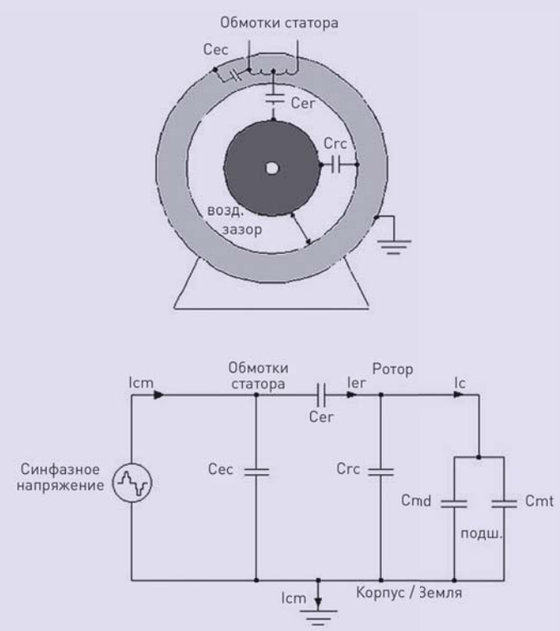


Рис. 15

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ТОКОВ



Cer — емкость, образованная обмотками статора и ротора (диэлектрик = воздушный зазор + изоляция ротора + изоляция провода);
Crc — емкость, образованная ротором и сердечником статора (диэлектрик = воздушный зазор);
Cec — емкость, образованная обмотками статора и корпусом (диэлектрик = изоляция ламината + изоляция провода);
Cmd и Cmt — емкости приводного и неприводного подшипников, образованные внутренней и внешней дорожками качения подшипников, с металлическими элементами качения во внутренней части (диэлектрик = зазоры между дорожками качения и телами качения + смазка для подшипников);
Icm — полный синфазный ток;
Ier — емкостной ток утечки, протекающий от статора к ротору;
Ic — емкостной ток утечки, протекающий через подшипники

Рис. 16

В зависимости от топологии преобразователя частоты [10] сумма векторов мгновенных напряжений трех фаз на его выходе не равна нулю, что обусловливает генерирование преобразователем так называемых синфазных гармоник напряжений, под действием которых возникают высокочастотные перенапряжения относительно «земли» (нейтрали электродвигателя или отрицательного полюса-шины звена постоянного тока), являющимися опасными для изоляции электрооборудования [12–16]. Высокочастотные синфазные напряжения, генерируемые ПЧ, являются основной причиной возникновения подшипниковых токов.

На рис. 14 показаны осциллограммы напряжения статора и напряжения на нейтрали относительно «земли» в установившемся режиме асинхронного электродвигателя, регулируемого ПЧ с ШИМ-инвертором тока, а на рис. 15 — осциллограмма напряжения на нейтрали асинхронного электродвигателя, регулируемого ШИМ-инвертором напряжения. Наводимое вследствие ШИМ высокочастотное напряжение на вал электродвигателя добавляется к существующему внутреннему напряжению, вызванному, например, электромагнитным дисбалансом, сопровождающимся током, циркулирующим через подшипники. Емкостное сопротивление электродвигателя становится низким вследствие высокочастотных составляющих напряжения на выходе ПЧ. Существующие паразитные емкости между электродвигателем и «землей» могут проводить ток на землю, образуя контур, проходящий через ротор, вал и подшипники, завершающийся заземленным экраном.

Чтобы на электродвигатель подавались токи, максимально приближенные по форме к синусоидальной, что влияет на плавность хода электропривода, колебания вала и дополнительные потери, в ШИМ-

АИН необходимо иметь высокую тактовую частоту ШИМ выходного напряжения. Возникающие при этом крутые импульсы напряжения вызывают в имеющихся емкостных сопротивлениях (подводка двигателя и обмотки двигателя) появление емкостных токов перезарядки. Это физическое явление особенно заметно на крупных электродвигателях среднего напряжения. При этом может образоваться замкнутая цепь тока через подшипники, что при неблагоприятном стечении обстоятельств приводит к повреждению подшипников высокочастотными емкостными импульсами тока.

Эквивалентная схема замещения электродвигателя для высокочастотных емкостных токов (на примере асинхронного электродвигателя) показана на рис. 16. В ней подшипники представлены емкостями и показаны пути протекания токов утечки. Ротор опирается на подшипники через слой непроводящей смазки. Благодаря равномерному распределению смазки при высокой скорости вращения нет контакта между ротором и наружной дорожкой качения подшипника. Электрический потенциал ротора может увеличиваться по отношению к земле до тех пор, пока не будет преодолена диэлектрическая прочность смазки. При этом возникает искрение и протекание разрядного тока через подшипники. Ток, протекающий в моменты пробоя смазки, назван в публикациях емкостной составляющей разрядного тока. Существует еще одна составляющая тока, который индуцируется потоком в магнитопроводе статора и постоянно циркулирует через характерный токопроводящий контур, состоящий из вала, подшипниковых щитов и корпуса. Ее часто называют резистивной составляющей.

Непостоянные электрические разряды изнашивают дорожки качения и ослабляют вращающиеся элементы подшипников качения, повышая температуру и образуя микроскопические раковины. Длительное протекание разрядного тока приводит к образованию борозд, которые уменьшают срок службы подшипников и могут приводить к преждевременному выходу из строя электродвигателя (см. в качестве примера рис. 17 и 18).

Для исключения прохождения подшипниковых токов двигателя при его работе от ПЧ должны быть учтены как резистивная составляющая (индуцированная на валу), так и емкостная (результат синфазного напряжения). Для того чтобы исключить ток, текущий через контур с подшипниками, достаточно изолировать хотя бы один из подшипников двигателя, если приводной вал один, или оба в случае двух приводных валов. Однако для исключения емкостной компоненты необходимо изолировать и подшипники рабочей машины, что позволит избежать протекания электрических зарядов от двигателя к ротору рабочей машины через валы, которые электрически связаны в случае прямого соединения.

Другой способ подавления емкостной компоненты тока заключается в коротком замыкании ротора и корпуса двигателя посредством скользящего контакта графитовой щеткой. Таким образом, индуктивная составляющая тока может быть устранена путем изолирования только одного подшипника мотора, в то время как емкостная составляющая тока, а также прохождение емкостных разрядов на рабочий механизм можно устранить путем использования токосъемной щетки [13, 4]. В случае неэкранированного соединительного кабеля его емкость на землю и токи утечки относительно невелики. В результате этого определяющее влияние будет оказывать емкость двигателя на землю. В идеальном случае паразитный

КРАТЕРЫ, ОБРАЗОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИЕЙ НА ВНУТРЕННЕЙ ДОРОЖКЕ ПОДШИПНИКА

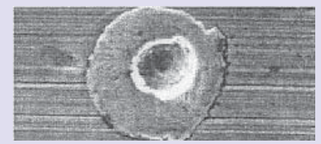


Рис. 17

ИЗНОС ДОРОЖКИ ПОДШИПНИКА ТОКОМ УТЕЧКИ

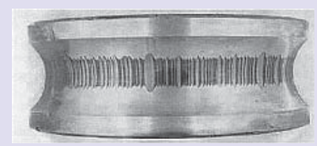


Рис. 18

ток течет на землю через корпус двигателя. Однако при некачественном заземлении в цепи появляется дополнительное сопротивление, ограничивающее ток утечки.
Как следствие, возрастает разность потенциалов между статором и ротором, что приводит к существенному увеличению подшипниковых токов, из-за чего резко снижается срок службы подшипников и двигателя в целом.

Для снижения токов в подшипниках эффективными мерами являются применение в преобразователе частоты фильтра защиты от синфазных помех, использование экранированного кабеля, а также хорошее заземление корпуса двигателя [11, 13–16]. Для заземления рекомендуется использовать многожильный высокочастотный провод с минимальным сечением 125 кв. мм, который выводится к ближайшей точке заземления.

Поскольку процессы, вызывающие появление подшипниковых токов, включают токи высоких частот, асимметрия в цепях должна быть сведена к минимуму. Для подключения двигателя допускается применение только симметричных многожильных кабелей. Защитное заземление должно быть размещено в силовом кабеле от преобразователя к двигателю симметрично во избежание токов вала на частоте основной гармоники выходного напряжения преобразователя частоты. При этом симметрия проводника защитного заземления достигается тем, что проводник окружает все фазные жилы (проводники) или в силовом кабеле между преобразователем частоты и двигателем делаются три заземляющих проводника, размещенных симметрично.

ВЫВОДЫ

1. Одной из основных причин эрозионного повреждения подшипников является кавитация, возникновение которой связано с завышенными значениями перепада давления в масляном клине, скорости потока масла и его температуры, а также низкое давление масла.
2. Кавитация в масляном клине подшипников турбоагрегатов приводит к двум основным отрицательным последствиям: возникает эрозионный износ вкладышей и колодок подшипников, увеличивается вибрация вала.
3. Признаками кавитационной эрозии на баббитовой заливке вкладышей радиальных подшипников являются: наличие округлых каверн и точечных углублений с острыми краями; обширная площадь повреждения и хаотичное расположение каверн. Признаками кавитационной эрозии на шейках валов может быть наличие округлых каверн и точечных углублений.
4. Кавитационная эрозия баббитовой заливки колодок упорных подшипников сопровождается возникновением каверн и точечных углублений с острыми краями в средней зоне колодок, а также наличием овальных и руслообразных канавок на кромках колодок.
5. Признаками электрической эрозии (но только если установлено нарушение заземления вала) являются: характерное дуговое оплавление, линейное расположение и овальность каверн вдоль направления вращения вала ротора.
6. Для предупреждения кавитационной эрозии вкладышей подшипников с баббитовой заливкой необходимо принятие мер, направленных на повышение статического давления масла, поступающего в подшипник, и понижение температуры масла ниже давления парообразования.
7. Регулирование скорости вращения крупных электродвигателей среднего напряжения ШИМ-преобразователями частоты сопровождается явлением наведенного на валах напряжения/тока из-за несбалансированной формы напряжения на выходе преобразователя и высокочастотных гармоник в спектре напряжения, подаваемого на электродвигатель.
8. Основной причиной возникновения подшипниковых токов электродвигателей являются

высокочастотные синфазные напряжения, генерируемые преобразователем.

9. Высокочастотное напряжение, наводимое вследствие широтно-импульсной модуляции на вал электродвигателя, добавляется к существующему внутреннему напряжению, вызванному, например, электромагнитным дисбалансом, и сопровождается током, циркулирующим через подшипники. Существующие паразитные емкости между обмотками электродвигателя и «землей» могут замыкать ток на «землю», образуя контур, проходящий через ротор, вал и подшипники, и завершающийся заземленным экраном.
10. Непостоянные электрические разряды изнашивают дорожки качения подшипников, ослабляя их вращающиеся элементы. Это приводит к повышению температуры и появлению микроскопических раковин. При длительном протекании разрядного тока образуются борозды, уменьшающие срок службы подшипников и приводящие к преждевременному повреждению электродвигателя.
11. Для снижения токов в подшипниках эффективными мерами являются применение в преобразователях частоты фильтров защиты от синфазных помех (например, синфазный реактор в звене постоянного тока преобразователя частоты с ШИМ-инвертором тока), использование экранированного кабеля, а также хорошее заземление корпуса электродвигателя.
12. Асимметрия в цепях подключения электродвигателя должна быть сведена к минимуму. Поэтому подключение электродвигателя должно выполняться только симметричными многожильными кабелями. Защитное заземление должно быть размещено в силовом кабеле от преобразователя частоты к электродвигателю симметрично во избежание токов вала на частоте основной гармоники выходного напряжения преобразователя частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.М. Курмакаев, Л.А. Хоменок. Проблема электроэрозионных повреждений турбоагрегатов ТЭЦ, ГРЭС И АЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. № 5 (67).
2. P. Tavner, L. Ran, J. Penmann, H. Sedding. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machinnes. The Institution of Engineering and Technology. London, UK, 2008.
3. Сайт Морского агентства «Транс-сервис». Ст.: Дефекты подшипников. Оценка их технического состояния: http://www.trans-service.org/ru.
4. Сайт компании «Автофор». Ст.: Ревизия и дефектовка подшипников: 1rti.ru.
5. Сайт компании King Engine Bearings Ltd. Ст.: Д. Копелиович. Как избежать отказов в работе подшипников скольжения: http://kingbearings.com/ru/avoid-failures-bearings.php.
6. Сайт компании ООО «Химмотолог». Ст: М.Н. Чистяков. Из опыта пробега подшипников скольжения ДВС на расстояние в миллион миль и более: http://himmotolog.ru.
7. А.К. Белотелов, С.А. Евдокимов и др. Повышение надежности заземления валов турбоагрегатов // Электрические станции. 2000. № 6.
8. А.Е. Языков, Б.Е. Мурманский. Повреждения подшипников паровых турбин. М.: Энергопрогресс, 2015 [Библиотечка электротехника. Приложение к журналу «Энергетик». Вып. 1 (193)].
9. Ю.Н. Самородов. Турбогенераторы. Аварии, инциденты. Техническое пособие. М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008.
10. Г.Б. Лазарев. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных схем // Новости электротехники. 2005. № 2 (32).
11. К. Гейзенбергер. Защита подшипников от повреждений, вызванных прохождением электрического тока. NKE Austria Gmbh: http://www.nke.at.
12. G.B. Lazarev. Electromagnetic compatibility of high-voltage frequency converters with auxiliary power-supply systems and asynchronous motors in thermal power stations // Russian Electrical Engineering. Vol. 75. № 10. Allerton Press, Inc. 2004.
13. ГОСТ Р 55136-2012/IEC/TS 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.
14. ГОСТ Р 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.
15. F. De Winter, N. Zargari, S. Rizzo, Y. Xiao. Medium Voltage Drives are isolation Transformers required // IEEE, paper № PCIC-2202-23. Rockwell Automation. Cambridge, ON, Canada, 2002.
16. G.B. Lazarev. Electromagnetic compatibility of high-voltage transformerless converters with controlled frequency output // Russian Electrical Engineering. Vol. 83. № 6. Allerton Press, Inc. 2012.
17. Асинхронные электродвигатели, управляемые от преобразователя частоты. // Техническое руководство. Weg.
18. http://www.quanton.ru/kavitacionnyj-nagrev/: Публикация НПО «Квантон», 2012.
19. В.А. Русов. Спектральная вибродиагностика. Пермь: Импульс-Вибро, 1996.
20. П.Г. Грудинский, О.Р. Лизунков. Зарядка роторов турбогенераторов паром // Электрические станции. 1935. № 6.
21. В.Г. Алексеев, С.А. Евдокимов, А.И. Левиуш. Повышение надежности заземления вала турбоагрегата и защита от замыкания на землю в обмотке статора турбогенератора, работающего на сборные шины. Тезисы доклада. Релейная защита и автоматизация в современных системах электропитания (Чебоксары, 9–13 сентября 2007 г.).
22. П.Г. Грудинский, С.А. Мандрыкин, М.С. Улицкий. Техническая эксплуатация основного электрооборудования станций и подстанций / Под ред. П.И. Устинова. М.: Энергия, 1974.
23. Эксплуатация турбогенераторов с непосредственным охлаждением / Под общ. ред. Л.С. Линдорфа и Л.Г. Мамиконянца. М.: Энергия, 1972.
24. Ю.Н. Самородов. Парадоксальные свойства скользящего контакта в ЩКА. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2013. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик». Вып. 6 (174)].