DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-94-101

УДК 621.313.13.027.3.048-52

ББК 3241-047-051.2

Г.А. КРАВЧЕНКО, Э.Л. ЛЬВОВА,
А.М. МАКАРОВ, С.В. СТОЛЯРОВ

МЕТОД НЕПРЕРЫВНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, контроль состояния электрической изоляции, метод контроля сопротивления изоляции.

Электрические машины имеют широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. В частности, электродвигатели являются одними из основных элементов в составе систем генерации электрической энергии. Применяемые при этом электрические машины обеспечивают надежную работу отдельных энергоблоков и всей системы электроснабжения в целом. Надежность работы двигателей в значительной степени определяется качеством его изоляции, поэтому усовершенствование методов контроля состояния изоляции высоковольтных асинхронных двигателей является актуальной задачей.

Цель исследования – на основе анализа данных опытно-промышленной эксплуатации разработать метод непрерывного автоматизированного контроля состояния электрической изоляции статорных обмоток асинхронного электродвигателя, позволяющий оценить динамику изменения основных параметров изоляции.

В статье рассмотрены основные элементы надежности высоковольтных электрических машин, применяемые электроизоляционные конструкции, методы контроля сопротивления изоляции высоковольтного электродвигателя. В основу исследований легли результаты опытно-промышленной эксплуатации автоматизированной системы контроля изоляции под рабочим напряжением на реальном объекте в группе компаний «Энергоприбор» г. Чебоксары.

Дан анализ существующих методов контроля изоляции, разработана схема контроля изоляции методом наложения тест-тока с частотой, отличной от промышленной. Предложен метод, позволяющий оценить динамику изменения сопротивления изоляции статорных обмоток асинхронного электродвигателя, выявить приближение ее к предельному допустимому состоянию в процессе эксплуатации и нахождении в резерве. Проведено программное моделирование, результаты которого соответствуют данным опытно-промышленной эксплуатации.

Результаты, полученные в ходе исследований, позволили систематизировать полученные экспериментальные данные, модернизировать аппаратную часть диагностического комплекса ДУКАТ-СКАД, очертить область критериев его применимости.

Электрические машины очень широко применяются в различных отраслях промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте, морском и речном флоте, в авиации, медицине, быту и т.д.

Высоковольтные электрические машины переменного тока делятся на асинхронные с фазным и короткозамкнутым ротором и синхронные с электромагнитным возбуждением. Широкое применение имеют асинхронные электродвигатели и синхронные: электродвигатели, генераторы и компенсаторы [2].

Электродвигатели являются одними из основных элементов в составе систем генерации электрической энергии. Ведущее место в производстве электроэнергии занимают тепловые электростанции (ТЭС), конденсационные (КЭС), теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) и др. Применяемые при этом электрические машины обеспечивают надежную работу отдельных энергоблоков и всей системы электроснабжения в целом.

Исследования, направленные на повышение эксплуатационной надежности высоковольтных асинхронных электродвигателей-приводов таких собственных нужд ТЭС, как дымосос, воздухоудка, питательный, конденсационный и циркуляционный насосы (рис. 1), имеют большое значение [4, 5].

Рис. 1. Структурная технологическая схема ТЭС:

Д – дымосос; ДВ – дутьевой вентилятор; ПН, КН, ЦН – питательный, конденсационный, циркуляционный насосы, соответственно; Э – эжектор; Т – силовой трансформатор; Тб – турбина, Др – деаэратор; с.н. – собственные нужды; СП – сетевой подогреватель; К – конденсатор (теплообменник); ХОВ – химически очищенная вода; Km – котел; РОУ – редукционно охлаждающая установка

Аварийная остановка перечисленного оборудования ТЭС напрямую влияет на надёжную работу энергоблока [5].

Надёжность работы двигателей в значительной степени определяется качеством его изоляции [1, 6]. Согласно имеющейся информации [1, 3], аварии из-за пробоя изоляции двигателей высокого напряжения собственных нужд электростанций составляли 54% общего числа аварий. Изоляция двигателей, работающих в тяжелых условиях (повышенная температура, вибрация, влага, загрязнение), изнашивается через 4-5 лет. Поэтому усовершенствование методов контроля (мониторинга) состояния изоляции высоковольтного асинхронного электродвигателя (ВАД) является актуальной задачей.

По данным Центрального проектно-конструкторского технологического бюро крупных электрических машин (ЦПКТБ КЭМ) по изучению эксплуатационной надежности двигателей высокого напряжения более половины всех отказов асинхронных двигателей высокого напряжения происходит в момент пуска и обуславливается повреждением статорной обмотки. Пробой изоляции статоров по своим последствиям является одним из наиболее тяжелых видов аварий. В связи с увеличившимся в последнее время количеством пусков двигателей на ТЭС, что связано с изменением характера нагрузки, возросло удельное число отказов этих двигателей.

В настоящее время в эксплуатации в основном находятся ВАД с микалентно-компаундированной изоляцией (МКИ) статорных обмоток. Такой вид изоляции имеет сравнительно низкую эксплуатационную надежность. Разработаны и внедряются изоляционные конструкции серии МОНОЛИТ – более надежные, но МКИ изоляция все еще имеет широкое применение [1].

Актуальным становится применение в процессе эксплуатации мониторинга состояния изоляции различного высоковольтного электрооборудования [6]. Данная статья посвящена разработке метода непрерывного автоматизированного контроля сопротивления изоляции (на примере статорной обмотки) высоковольтного асинхронного электродвигателя.

Существуют различные методы контроля состояния изоляции, направленные на раннее выявление изменения её характеристик, указывающих на необходимость проведения профилактических работ¹ [6].

Рассмотрим ВАД в электрической сети с изолированной нейтралью. На рис. 2, а представлена стандартная схема контроля состояния изоляции под рабочим напряжением с применением трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП).

При включенном ВАД рабочие токи (I_p) текут так же, как и в обмотке электродвигателя, одновременно происходит растекание токов через изоляцию (I_{ym}). Реакция релейной защиты происходит только при резком изменении сопротивления изоляции кабеля или двигателя – однофазном замыкании на землю. В таких случаях для безопасности персонала защита настраивается на отключение ВАД от сети.

Для контроля снижения сопротивления изоляции до предельных нижних значений используется метод наложения токов с частотой, отличной от промышленной (50 Гц). Схема представлена на рис. 2, б.

Главными преимуществами такого подхода являются:

- получение реального воздействия электрического поля промышленной частоты на изоляцию, а по малым значениям тест-сигналов, которые проникают сквозь места ослабленной изоляции, можно судить о ее техническом состоянии;
- возможность организации мониторинга под рабочим напряжением.

На практике метод наложения осуществляется при помощи дугогасящего реактора или трансформатора напряжения. Преимуществами такого подхода являются использование готовых технических устройств, простота и безопасность подключения генератора через нулевой проводник. Но в таком случае наибольшее растекание тест-тока проходит в сеть за счет её большей емкости. Протекание тока в изоляцию системы кабель-двигатель оказывается малым и его практически невозможно измерить, за исключением однофазного замыкания на землю. Поэтому данный принцип для чувствительного контроля сопротивления изоляции ВАД является неэффективным.

¹ СО 34.45.509-2005 Типовая инструкция по эксплуатации электродвигателей в установках собственных нужд электростанций. М., 2005.

Рис. 2. Контроль сопротивления изоляции ВАД :

а – с применением ТТНП (А, В, С – фазные ЭДС сети; I_p , I_{yT} – нагрузочные токи и токи утечки; ТТНП – трансформатор тока нулевой последовательности; КЛ – силовой кабель; ВАД – высоковольтный асинхронный электродвигатель; C , R – активные и емкостные составляющие сопротивлений изоляции сети и системы кабель – ВАД; $3I_0$ – токи нулевой последовательности);
б – методом наложения тест-токов (E_a , E_b , E_c – фазные ЭДС сети; I_n – нагрузочные токи; I_a , I_b , I_c – наложенные токи; ДГР – дугогасящий реактор; Z_n – сопротивления нагрузки объекта контроля; C – емкостные составляющие сопротивлений изоляции объекта контроля; ТС – первичные преобразователи тока; РЗ – устройства защиты (реле); Г – генератор наложенного напряжения; $I_a(f)$, $I_b(f)$, $I_c(f)$ – наложенные токи с частотой f ; ТН – трансформатор напряжения)

В работе рассматриваются варианты наложения тест-тока и расположения точек контроля напряжения пропорционального сопротивлению изоляции системы кабель-ВАД. Предлагается последовательное подключение источника наложения сигнала, что позволяет объединить сопротивления сети и системы кабель-ВАД в одну цепь. Схема для контроля сопротивления изоляции методом наложения сигнала при последовательном подключении источника наложения представлена на рис. 3.

Рис. 4. Упрощенная программная модель:

$R1, R2, R3$ – активные составляющие сопротивлений изоляции сети; $C1, C2, C3$ – емкостные составляющие сопротивления изоляции сети; $R6, R7, R8$ – активные составляющие сопротивлений изоляции системы кабель – ВАД; $C4, C5, C6$ – емкостные составляющие сопротивления изоляции сети; $LAP1, LAP2, LAP3$ – датчики напряжения; $TX1$ – эквивалент преобразователя; $V1$ – источник напряжения; $R4$ – активное сопротивление преобразователя $TX1$

В ходе экспериментов наблюдались:

– смещения по фазе контрольного напряжения той фазы, в которой изменялось активное сопротивление системы кабель – ВАД. Теоретически данный эффект объясняется изменением тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) исследуемой изоляции. Изменение характеристик представлено на рис. 5 – при уменьшении активного сопротивления ($R6$) с 200 МОм до 1 МОм вектор полного сопротивления Z смещается;

Рис. 5. Результаты моделирования: $R(200 \text{ МОм}), R(10 \text{ МОм}), R(1 \text{ МОм})$ – условные положения векторов при значениях 200, 10, 1 МОм, соответственно; $C4$ – условное положение вектора емкостной составляющей; $Z(10), Z(1)$ – условное положение векторов полного сопротивления Z при значениях $R6$ – 10 и 1 МОм, соответственно

– изменения комплексных сопротивлений Z имеют отклик в контрольных точках – смещения по фазе. На рис. 5 отображены участки амплитудных значений для одной из контрольных точек при изменении активного сопротивления кабель – ВАД.

По результатам проведенных исследований разработанной методики на программной модели были сделаны следующие выводы:

1. Показаны преимущества метода наложения сигнала по предложенной методике (место наложения сигнала, выбор точек контроля).

2. Преимуществом данного метода является то, что на результаты измерений не влияют динамические изменения параметров сети.

3. Появилась возможность выделить граничные значения сопротивления изоляции, заданные в нормативной документации¹ [7].

4. Создана теоретическая база для разработки программно-аппаратной части и выбраны направления дальнейших исследований.

5. Результаты моделирования соответствуют данным опытно-промышленной эксплуатации.

Литература

1. Евтушенко Ю.М. Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 272 с.

2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 656 с.

3. Козлов А.Н., Козлов В.А., Ротачева А.Г. Собственные нужды тепловых, атомных и гидравлических станций и подстанций. 2-е изд., испр. и доп. Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2013. 315 с.

4. Коломиец Н.В., Пономарчук Н.Р., Шестакова В.В. Электрическая часть электростанций и подстанций. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 143 с.

5. Миронова А.Н., Миронов Ю.М. Электрооборудование и электроснабжение электротехнологических установок. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ИНФРА-М, 2020. 469 с.

6. Назарычев А.Н. Методы и модели оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния. Иваново: Изд-во Иван. гос. энерг. ун-та. 2002. 168 с.

КРАВЧЕНКО ГАЛИНА АЛЕКСЕЕВНА – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Чебоксары, Россия (krav68@bk.ru).

ЛЬВОВА ЭЛЬВИРА ЛЬВОВНА – старший преподаватель кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Чебоксары, Россия (elyalvov1@yandex.ru).

МАКАРОВ АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Чебоксары, Россия (alex41mak@yandex.ru).

СТОЛЯРОВ СЕРГЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ – технический директор, Группа компаний «Энергоприбор», Россия, Чебоксары (info.energopribor@mail.ru).

Galina A. KRAVCHENKO, Elvira L. LVOVA,
Alexey M. MAKAROV, Sergey V. STOLYAROV

THE METHOD OF CONTINUOUS AUTOMATED RESISTANCE CONTROL OF HIGH VOLTAGE MOTOR INSULATION

Key words: asynchronous electric motor, control of electrical insulation condition, method of controlling insulation resistance.

¹ РД 34.45-51.300-97 Объем и нормы испытаний электрооборудования. М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2004.

Electrical machines are widely used in various branches of the national economy. In particular, electric motors are one of the main elements in electrical power generation systems. The electric machines used at this ensure reliable operation of individual power units and the entire power supply system in general. The reliability of engines' operation is largely determined by the quality of its insulation, that is why the improvement of methods for controlling the isolation of high voltage asynchronous motors is an actual task.

The aim of the research is to develop a method of continuous automated control of electric insulation condition in stator windings of an asynchronous motor basing on the analysis of experimental and industrial operation data making it possible to estimate the dynamics of changes in the main insulation parameters.

The main elements showing reliability of high-voltage electric machines, applied electro-insulation structures, methods for controlling insulation resistance in a high-voltage electric motor are considered in the article. The research performed was based on the results of the experimental and industrial operation of the automated system of insulation control under working voltage at the real facility carried out by the group of companies «Energopribor» of the town of Cheboksary.

The analysis of existing methods for insulation control is given, the scheme of insulation control by superpositioning test current with the frequency which is different from industrial one. The authors propose the method to estimate the dynamics of resistance changes in insulation of stator windings of the asynchronous motor, to reveal its approximation to the maximum permissible state in the process of operation and in reserve shutdown. Software modeling was carried out, the results of which correspond to the data of experimental and industrial operation.

The results obtained during the research allowed to systematize the obtained experimental data, to modernize the hardware part of the diagnostic complex DUKAT-SCAD, to outline the criteria area for its applicability.

References

1. Evtushenko Yu.M. *Elektroizolyatsionnye materialy i sistemy izolyatsii dlya elektricheskikh mashin*. [Electrical insulating materials and insulation systems for electrical machines]. Moscow, 2012, 272 p.
2. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electric motors]. Moscow, 2004, 656 p.
3. Kozlov A.N., Kozlov V.A., Rotacheva A.G. *Sobstvennye nuzhdy teplovykh, atomnykh i gidravlicheskh stantsii i podstantsii* [Own needs of thermal, nuclear and hydraulic stations and substations]. Blagoveshchensk, 2013, 315 p.
4. Kolomiets N.V., Ponomarchuk N.R., Shestakova V.V. *Elektricheskaya chast' elektrostantsii i podstantsii* [Electrical part of power plants and substations]. Tomsk, 2007, 143 p.
5. Mironova A.N., Mironov Yu.M. *Elektrooborudovanie i elektroснабженіе elektrotekhnologicheskikh ustanovok* [Electrical equipment and power supply for electrical installations]. Moscow, INFRA-M Publ., 2020, 469 p.
6. Nazarychev A.N. *Metody i modeli optimizatsii remonta elektrooborudovaniya ob'ektov energetiki s uchetom tekhnicheskogo sostoyaniya* [Methods and models for optimization of repair of electrical equipment of power facilities, taking into account the technical condition]. Ivanovo, 2002, 168 p.

GALINA A. KRAVCHENKO – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrotechnology, Electrical Equipment and Automated Production, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (krav68@bk.ru).

ELVIRA L. LVOVA – Senior Lecturer, Department of Electrotechnology, Electrical Equipment and Automated Production, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (elyalvov1@yandex.ru).

ALEXEY M. MAKAROV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrotechnology, Electrical Equipment and Automated Production, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (alex41mak@yandex.ru).

SERGEY V. STOLYAROV – Technical Director, Voltron Engineering Center LLC, Russia, Cheboksary (info.energopribor@mail.ru).

Формат цитирования: Кравченко Г.А., Львова Э.Л., Макаров А.М., Столяров С.В. Метод непрерывного автоматизированного контроля сопротивления изоляции высоковольтного электродвигателя // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 3. – С. 94–101. DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-94-101.