деятельность отраслевых предприятий, но и будет способствовать развитию энергетического рынка страны в целом.

1. Черкасова Н.И., Татарникова А.Н. Экономика энергетики: Учебное пособие для студентов специальности 140211 всех форм обучения / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2011. – 147 с.
2. Прогноз развития энергетики мира и России 2016 / под ред. А.А.Макарова, Л.М.Григорьева, Т.А.Митровой; ИНЭИ РАН–АЦ при Правительстве РФ – Москва, 2016. – 196 с. - ISBN 978-5-91438-023-3
3. Барановский А. И., Кожевников Н. Н., Пирадова Н. В. и др. Экономика промышленности. М.: Издательство МЭИ, 1998. 296 с.
4. Басова Т. Ф., Кожевников Н. Н., Леонова Э. Г. и др. Экономика и управление в энергетике. М.: Академия, 2003. 384 с.
5. Рогалев Н. Д., Зуюкова А. Г., Мастерова И. В. и др. Экономика энергетики. М.: Издательство МЭИ, 2005. 288 с.
6. Соколова Е.С., Тулешов А.А. Капитальные вложения в энергетике . сборник материалов XIV международной очно-заочной научно-практической конференции 2019 Издательство: Научно-издательский центр "Империя" (Москва)

Соболь А.Н., Андреева А.А.

Анализ существующих устройств диагностики и защиты автономных асинхронных генераторов гибридных ветро-солнечных установок

ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т.

Трубилина

(Россия, Краснодар)

doi: 10.18411/lj-01-2021-50

idsp: ljjournal-01-2021-50

Аннотация

Из всех видов альтернативных источников электроэнергии наиболее эффективны и удобны солнечные батареи и ветрогенераторы. Ветряки, солнечные батареи и дополнительные устройства составляют автономную систему. В настоящее время актуальным остается вопрос использования автономных асинхронных генераторов с емкостным возбуждением в ветрогенераторах. Существует очень небольшое количество защит электрических машин от внутренних коротких замыканий в статорной обмотке. Для разработки устройства защиты генератора кроме анализа токов и напряжений целесообразно также рассмотреть изменение вибрации генератора при повреждении.

Ключевые слова: электроэнергия, ветрогенератор, автономный асинхронный генератор, витковые замыкания в обмотке статора, защита.

Abstract

Of all types of alternative sources of electricity, solar panels and wind generators are the most efficient and convenient. Wind turbines, solar panels and additional devices make up an autonomous system. Currently, the issue of using autonomous asynchronous generators with capacitive excitation in wind generators remains relevant. There are very few protections for electrical machines against internal short circuits in the stator winding. To develop a generator protection device, in addition to analyzing currents and voltages, it is also advisable to consider the change in vibration of the generator in case of damage.

Keywords: electricity, wind generator, stand-alone asynchronous generator, turn circuits in the stator winding, protection.

Из всех видов альтернативных источников электроэнергии наиболее эффективны и удобны солнечные батареи и ветрогенераторы. Солнечные батареи привлекают своим длительным сроком службы (производители заявляют 25 - 30 лет) и необслуживаемостью. Минус - зимой дают меньше электричества за счёт более короткого светового дня. Ветряки, в сравнении с солнечными батареями, как правило, более производительны при той же стоимости. Но и менее надёжны. Ветряки, солнечные батареи и дополнительные устройства составляют автономную систему.

В настоящее время актуальным остается вопрос использования автономных асинхронных генераторов (ААГ) с емкостным возбуждением в гибридных ветро-солнечных установках.

Асинхронные генераторы устойчивы к коротким замыканиям, а устройства автоматической регулировки напряжения сглаживают перепады напряжения.

Применение надежной и эффективной защиты от аварийных режимов работы значительно сократит количество и частоту аварийных ситуаций и продлит срок службы ААГ, сократит эксплуатационные расходы [1]. Для того чтобы выбрать эту защиту необходимо знать, как защищать генератор, а также специфику процессов, протекающих в нем при повреждениях.

В процессе эксплуатации электрической машины ее изоляция неизбежно “стареет”. Основными причинами этого являются: нагревание обмоток рабочими и пусковыми токами, токами КЗ и перегруза, теплотой от посторонних источников; динамическими усилиями, возникающими при взаимодействии проводников с током, коммутационными перенапряжениями. На состояние изоляции большое влияние оказывают также условия окружающей среды – температура и влажность воздуха, загрязненность и запыленность.

При снижении сопротивления изоляции высока вероятность появления пробоя обмотки статора электрической машины на корпус. Не менее важным является контроль состояния изоляции обмоток статора во время работы. Для этого используется измерение тока утечки на “землю” с помощью дифференциального трансформатора тока, реагирующего на появление дифференциального тока выше некоторой уставки, заданной пользователем [2].

Термочувствительные устройства защиты относятся к встраиваемой защите. Они располагаются в специально предусмотренных для этой цели гнездах в лобовых частях (защита от заклинивания ротора) или в обмотках электрических машин. Недостатком данного вида защиты является то, что с датчиками выпускаются далеко не все типы машин. Это особенно касается электрических машин отечественного производства. Причем датчики могут устанавливаться только в условиях стационарных мастерских. Кроме того, температурная характеристика термистора достаточно инерционна и сильно зависит от температуры окружающей среды и от условий эксплуатации [3].

Даже самые лучшие устройства не решают полностью задачу по защите электрических машин от механических перегрузок, перекоса фазных токов, связанных с внутренними авариями или ухудшением сопротивления изоляции обмоток [8].

В настоящее время попытки создать универсальную эффективную защиту предпринимаются различными производителями. Наибольшее распространение получили две идеологии: фазовый метод, реализованный в большинстве импортных дорогостоящих устройств, и контроль параметров работы машины по величине действующего значения тока в каждой из фаз, положенный в основу отечественных устройств. Задача создания универсального защитного устройства оказалась достаточно сложной по разным причинам. Например, ток необходимо измерять как можно точнее, ведь известно, что длительная работа электрической машины всего лишь при 5%-ной перегрузке сокращает срок службы в 10 раз. Также в связи с возможной несинусоидальностью кривой тока необходимо определять действующее значение токов, включая гармонический анализ, чтобы учесть значения высших

гармоник, оказывающих наиболее вредное влияние на пусковые и рабочие характеристики машины. Работа по пиковым значениям (длительным фронтам) или по неким усредненным суммам приводит к ложным срабатываниям. Необходимо обеспечить отстройку от 7 – 8 кратных пусковых токов, одновременно обеспечив отключение электрической машины даже при небольших перегрузках. Защита должна быть “умной”, т. е. время срабатывания должно зависеть от тока. Необходимо отключать электрическую машину при возникновении асимметрии токов, так как это приводит к биению ротора. Необходимо учитывать также тепло, выделяемое при пусках электрической машины, т. к. при частых пусках она может перегреться пусковыми токами, имея на валу нагрузку ниже номинальной [7].

Существует также так называемое фазочувствительное устройство защиты (ФУЗ). ФУЗ срабатывает при обрыве фазы во время пуска и заклинивании ротора или исполнительного механизма. Защита весьма чувствительна к обрыву фазы при пуске машины, а при работе с перегрузками ток в катушке реле увеличивается медленно, что позволяет защите срабатывать с выдержкой времени.

Большинство коротких замыканий являются несимметричными, при которых уровень тока короткого замыкания (КЗ) ниже, чем при трехфазных. Поэтому чувствительность защит, реагирующих на фазные токи, в этом случае оказывается меньше. Если же несимметричные КЗ обнаруживать по составляющим тока, характерным для несимметричного режима, практически отсутствующим в нормальном режиме, то чувствительность защит существенно повышается [6].

Устройства защиты от витковых КЗ подразделяются на три группы:

- 1) основанные на контроле несимметрии фазных токов;
- 2) основанные на контроле симметрии магнитного поля электрической машины;
- 3) основанные на контроле высших гармонических в токах статора и ротора.

В настоящее время защиты от витковых замыканий обмоток статора электрических машин не устанавливаются как из-за трудности обеспечения чувствительности и сложности исполнения, так и из-за отсутствия согласованной стратегии в вопросах их разработки и изготовления. Весьма чувствительными считаются защиты, контролирующие симметрию магнитного поля внутри самой машины, поскольку на внешнюю несимметрию они не реагируют [39, 58]. Самой простой из них является защита с кольцевым преобразователем, но она недостаточно чувствительна на машинах с числом пар полюсов $p=1$. Такие защиты реализуются на встраиваемом в электрическую машину кольцевом измерительном преобразователе (КИП), который представляет собой (рисунок 1) катушку индуктивности, размещенную в торцевой зоне асинхронной машины соосно с валом. Такой КИП применяется в мощных асинхронных электрических машинах. В защитах электрических машин концы катушки многовиткового КИП и вторичной обмотки согласующего трансформатора подключается к реагирующему органу.

Кольцевой преобразователь содержит (рисунок 1) плоскую катушку с корпусом 1 из диэлектрика с наложенными на него витками 2 изолированного провода. Корпус 1 закрепляется при помощи шпилек 3 на внутренней стороне подшипникового щита 4 электрической машины 5 так, чтобы его торцевые поверхности были перпендикулярны оси 6 вращения ротора. Преобразователь может быть выполнен в виде металлического кольца, проходящего через отверстие тороидального сердечника из ферромагнитного материала с равномерно намотанными витками изолированного провода. Кольцо крепится перпендикулярно оси вращения ротора при помощи банджа на торце лобовой части обмотки статора или при помощи кронштейнов [39].

Существует еще множество других устройств защиты. Например, предлагается устройство, позволяющее диагностировать состояние электрической машины и защищать ее от возникшего повреждения, производить индикацию о нормальной

работе машины и видах возникших повреждений: обрывах фаз или срабатываниях предохранителей при КЗ, срабатываниях температурной защиты при перегрузках. Устройство диагностики содержит блок температурной защиты и блок индикации повреждений. Существуют и другие устройства.

Также существуют попытки разработки единого универсального (обеспечивающего защиту по напряжению, току и температуре элементов как раздельной, так и совместно) и унифицированного (для электроустановок различных типов и мощностей) устройства. Однако разработка такого устройства затруднена из-за сложных, а иногда и противоречивых требований к защите каждой конкретной установки. Подход к выполнению защит асинхронного электродвигателя и ААГ должен быть различным, так как несимметрия токов у двигателя появляется при повреждении обмотки, а у ААГ за счет несимметрии нагрузки [4].

Большинство повреждений обмоток генератора вызывается нарушением изоляции обмоток статора и ротора. В статоре возникают межфазные КЗ, замыкание одной фазы на корпус (на землю), замыкание между витками одной фазы.

Рисунок 1 – Размещение кольцевого преобразователя внутри машины

Способы выполнения защит генераторов от замыканий между витками рассмотрены в [2]. При наличии выведенных параллельных ветвей обмотки статора наиболее просто выполняется односистемная поперечная дифференциальная токовая защита (рисунок 2). Параллельные ветви соединяются по схеме звезды каждая, в цепь между нейтралью которых включается трансформатор тока ТА.

Рисунок 2 – Поперечная дифференциальная токовая защита генератора

Для отстройки от токов высших гармонических реле КА подключается к трансформатору тока ТА через частотный фильтр ZF, пропускающий только составляющую тока промышленной частоты. Недостатком защиты является возможность отказа при малом числе замкнувшихся витков [5].

Таким образом, можно говорить о том, что существует очень небольшое количество защит электрических машин от внутренних КЗ в статорной обмотке. Для построения соответствующих защит ААГ нужно провести теоретические и экспериментальные исследования его повреждений. Кроме перечисленных выше признаков повреждения (изменение токов, напряжений ААГ и их гармонических составляющих), целесообразно также рассмотреть изменение вибрации генератора при повреждении [9].

1. Богдан А.В. Диагностика повреждений обмотки статора автономного асинхронного генератора [Текст]. / А.В. Богдан, А.Н. Соболев // Известия вузов. Электромеханика. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова, 2013. – № 1. С. 70-71.
2. Богдан А.В. Измерение сопротивления нулевой последовательности силового трансформатора У/УН-12 [Текст]. / А.В. Богдан, А.Н. Соболев, В.А. Богдан // Сельский механизатор, – М.: ООО «Нива», 2018. № 11. С. 40 – 41.
3. Богдан А.В. Информационные признаки повреждения обмотки статора для построения релейной защиты автономного асинхронного генератора [Текст]. / А.В. Богдан, А.Н. Соболев // Известия вузов. Электромеханика. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова, 2017. – № 6. С. 72-76.
4. Богдан А.В. Математическая модель самовозбуждения автономного асинхронного генератора [Текст]. / А.В. Богдан, А.Н. Соболев // Труды Кубанского государственного аграрного университета. Краснодар: КубГАУ, 2012. – № 36. С. 322-324.
5. Богдан А.В. Обнаружение виткового замыкания в обмотке статора асинхронного генератора [Текст]. / А.В. Богдан, А.Н. Соболев, Н.С. Баракин // Сельский механизатор – М.: ООО «Нива», 2018. – № 7-8. С. 44 – 45.
6. Богдан А.В. Применение асинхронного генератора для питания асинхронных двигателей [Текст]. / А.В. Богдан, А.Я. Ильченко, М.В. Ерохов, А.Н. Соболев // Научный журнал КубГАУ. (Полиметаматический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета). – Краснодар.: КубГАУ. – № 97 (03). С. 616 – 625.
7. Пат. 66127 U1 Российская Федерация, МПК Н 02 К 11 00, Н 02 Н 7 08. Устройство для дифференциальной защиты асинхронного генератора [Текст]. / Соболев А. Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет. № 2006147115/22; заявл. 27.12.06; опубл. 27.08.07, Бюл. № 24. – 4 с.
8. Пат. 2313890 Российская Федерация, МПК 51 Н02М 7/08, Н02Н 3/28. Устройство для дифференциально-фазной защиты [Текст]. / Богдан А.В., Соболев А. Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет. № 2006124282; заявл. 06.07.2006; опубл. 27.12.2007, Бюл. № 36. – 5 с.
9. Пат. 2295815 Российская Федерация, МПК 51 Н02Н 7/08, G01М 15/00, Н02К 15/00. Устройство защиты машин переменного тока [Текст]. / Богдан А.В., Стрижков И.Г., Потапенко И.А., Соболев А.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет. № 2005131150; заявл. 07.10.2005; опубл. 20.03.2007, Бюл. № 8. – 4 с.