

УДК 621.317.75

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ОБОРУДОВАНИЙ

З.К.НУРУБЕЙЛИ*, Т.К.НУРУБЕЙЛИ*, **, А.А.МАММАДЙАРОВ*, И.М.ИСМАИЛОВ*

*Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности**

AZ-1010, Азербайджан, г. Баку, пр. Азадлыг, 34

*Министерство Науки и Образования, Институт Физики***

AZ 1143, Азербайджан, г. Баку, пр. Г.Джавида, 131

t.nurubeyli@physics.science.az, znurubayli@cbmes.com,

kamilnuri@rambler.ru, omartarana@gmail.com

Получена: 07.01.2024

Принята к печати: 02.03.2024

РЕФЕРАТ

Статья посвящена возможности комплексного подхода в применении инструментов мониторинга состояния и диагностики неисправностей машин высокого напряжения. Проведен обзор литературных данных по контролю состояния электрических машин, и некоторых важных аспектов, такие как мониторинг состояния, диагностика неисправностей, тепловой, электрический мониторинг, мониторинг вибрации, шума, анализ характеристик тока двигателя, быстрое преобразование Фурье, методы обработки сигналов. Рассмотрены наиболее важные разработки в этой области от ранних исследований до последних.

Ключевые слова: мониторинг вибрации, диагностика неисправностей, электромеханическое устройство, обмотка ротора.

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг состояния высоковольтного оборудования является сложной задачей для инженеров и исследователей, в основном, в промышленности. Существует множество различных подходов к методам мониторинга состояния, включая как механические, так и электрические. Однако все эти методы мониторинга требуют дорогостоящих датчиков или специализированных инструментов. Методы мониторинга обычно применяются для обнаружения различных типов неисправностей электрических машин, таких как неисправность ротора, короткая обмотка, ошибка эксцентриситета воздушного зазора, неисправность нагрузки и т. д.

Электрические машины широко используются и являются основой большинства инженерных систем. Эти машины использовались во всех видах промышленности. Асин-

хронная машина является одной из этих машин, которая содержит магнитную цепь, соединенную с двумя электрическими цепями, вращающимися относительно друг друга, в которых мощность передается от одной цепи к другой посредством электромагнитной индукции. В этих электромеханических устройствах электрическая энергия преобразуется в механическую форму [1]. Преобразование энергии зависит, с одной стороны, от существования в природе явлений, связывающих магнитное и электрическое поля, с другой стороны, от механической силы и движения. Обмотка ротора в асинхронных двигателях может быть короткозамкнутого или роторного типа.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором состоит из проводящих стержней, вставленных в пазы железного ротора и закороченных на каждом конце проводящими концевыми кольцами. Стержни ротора обычно изготавливаются из меди, алюми-

ния, магния или сплава и помещаются в пазы. Стандартные короткозамкнутые роторы не имеют изоляции, поскольку стержни пропускают большие токи при низком напряжении. Другой тип ротора, называемый ротором с формованной обмоткой, имеет многофазную обмотку, аналогичную трехфазной обмотке статора. Выводы обмотки ротора соединены с тремя изолированными контактными кольцами, установленными на валу ротора. Такой двигатель проще, экономичнее и надежнее, чем асинхронный двигатель с фазным ротором. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором представляет собой двигатель с постоянной скоростью при подключении к источнику питания постоянного напряжения и частоты. Если момент нагрузки увеличивается, скорость падает на небольшую величину. Поэтому он пригоден для использования в системах привода с постоянной скоростью [1, 2].

Данная статья посвящена возможности комплексного подхода в применении инструментов мониторинга состояния и диагностики неисправностей машин высокого напряжения. Мониторинг состояния критически важных компонентов высоковольтных станков является ключевым фактором повышения эксплуатационной готовности станков и достижения более надежного процесса обработки. Отказы и нестабильность в компонентах машин высокого напряжения могут отрицательно сказаться на их надежности и, как следствие, сократить срок их службы.

Электрические машины часто подвергаются воздействию неидеальных или даже вредных условий эксплуатации. К таким обстоятельствам относятся перегрузка, недостаточная смазка, частые запуски/остановки двигателя, недостаточное охлаждение и т. д. В этих условиях электродвигатели подвергаются нежелательным нагрузкам, которые подвергают двигатели риску неисправности или выхода из строя [3].

В соответствии со стандартом IEEE 493-1997 [4] наиболее распространенные неисправности и их статистические данные перечислены в таблице 1. Эта таблица основана на обзоре раз-

личных двигателей промышленного применения. Согласно таблице, больше всего неисправностей случается с подшипниками и обмотками.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ

Представленное исследование основано на мониторинге состояния и диагностике неисправностей электрических машин. Диагностика неисправностей - это определение конкретной неисправности, произошедшей в системе [6, 7].

Мониторинг состояния электрических и механических устройств применяется на практике уже довольно давно. Со временем появилось несколько методов, но наиболее известными методами являются тепловой мониторинг, мониторинг вибрации, электрический мониторинг, мониторинг шума, мониторинг крутящего момента и контроль магнитного потока.

1. ТЕПЛОВОЙ МОНИТОРИНГ

Тепловой контроль электрических машин осуществляется либо путем измерения локальной или объемной температуры двигателя, либо путем оценки параметров. Токовая неисправность статора приводит к чрезмерному нагреву закороченных витков, и это тепло усиливает серьезность неисправности до тех пор, пока она не достигнет разрушительной стадии. Поэтому некоторые исследователи разработали тепловую модель электродвигателей [8].

Температурный мониторинг, как правило, можно использовать как косвенный метод для обнаружения некоторых неисправностей статора (межвитковые неисправности) и подшипников. При межвитковом замыкании температура в области повреждения повышается, но этот процесс может быть слишком медленным, чтобы обнаружить зарождающееся замыкание до того, как оно перерастет в более серьезное межфазное замыкание или замыкание между фазами и нейтралью.

Таблица 1

Статистика неисправностей двигателя/режимов отказа [5].

Тип неисправности	Индукционный двигатель	Синхронный двигатель	Двигатели с фазным ротором	Двигатели постоянного тока	Все моторы
Несущий	152	2	10	2	166
Обмотка	75	16	6	--	97
Роторы	8	1	4	--	13
Вал	19	-	--	--	19
Щетки или контактные кольца	--	6	8	2	16
Внешнее устройство	40	7	1	-	18
Другие	10	9	--	2	51

В случае обнаружения неисправности повышенный износ подшипника увеличивает трение и температуру в этой области машины. Это повышение температуры двигателя можно обнаружить с помощью теплового мониторинга.

2. КОНТРОЛЬ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

Все типы неисправностей двигателя создают боковые полосы на особых частотах крутящего момента воздушного зазора. Однако невозможно непосредственно измерить крутящий момент воздушного зазора. Разница между расчетными крутящими моментами модели указывает на наличие сломанных стержней. Мгновенная мощность, поступающая со входных клемм, включает в себя энергию зарядки и разрядки обмоток. Следовательно, мгновенная мощность не может отражать мгновенный крутящий момент. С выходных клемм ротор, вал и механическая нагрузка вращающейся машины образуют систему торсионных пружин, имеющую собственную частоту. Затухания составляющих крутящего момента воздушного зазора, передаваемого через систему торсионных пружин, различны для разных порядков гармоник составляющих крутящего момента [9].

3. МОНИТОРИНГ ШУМА

Мониторинг шума осуществляется путем измерения и анализа спектра акустического шума. Акустический шум от эксцентриситета

воздушного зазора в асинхронных двигателях можно использовать для обнаружения неисправностей. Однако применение измерений шума на заводе непрактично из-за шумового фона от других машин, работающих поблизости. Этот шум снижает точность обнаружения неисправностей данным методом. С помощью этого метода Эллисон и Янг [10] обнаружили эксцентриситет воздушного зазора. В результате испытаний, проведенных в безэховой камере, они подтвердили, что щелевые гармоники в спектрах акустического шума асинхронного двигателя небольшой мощности являются функцией статического эксцентриситета.

4. МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

В большинстве случаев ток статора контролируется для диагностики различных неисправностей асинхронного двигателя. Рэнди Р. Шон [11] представил метод оперативного обнаружения зарождающихся неисправностей асинхронного двигателя, который не требует пользовательской интерпретации характеристики тока двигателя, даже при наличии неизвестной нагрузки и состояния линии. Избирательный частотный фильтр распознает характеристические частоты асинхронной машины при работе при нормальных условиях нагрузки. Генерируемая таблица частот сокращается до управляемого числа за счет использования набора правил экспертной системы, основанных на известной физической конструкции машины. Этот список частот формирует входные данные алгоритма кластеризации нейрон-

ной сети, которые сравниваются с рабочими характеристиками, полученными из начальных характеристик двигателя.

Шен и Хабетлер исследовали влияние изменяющегося в положении момента нагрузки на обнаружение эксцентриситета воздушного зазора. Было обнаружено, что колебания крутящего момента вызывают те же гармоники, что и эксцентриситет. Эти гармоники всегда намного больше, чем гармоники неисправности, связанные с эксцентриситетом. Таким образом, был сделан вывод, что невозможно разделить колебания крутящего момента и эксцентриситет, если не известно угловое положение места нарушения эксцентриситета относительно характеристики момента нагрузки [12,13].

Рэнди Р.Шон и Томас Г.Хабетлер представили анализ влияния нагрузок, меняющихся в положении, на спектр гармоник тока. Было показано, что гармоники, вызванные крутящим моментом нагрузки, совпадают с гармониками, вызванными неисправностью ротора, когда нагрузка изменяется синхронно с положением ротора. Кроме того, поскольку влияние нагрузки и повреждения на одну гармоническую составляющую тока статора пространственно зависит, часть, вызванная повреждением, не может быть отделена от части нагрузки. Следовательно, любая схема оперативного обнаружения, измеряющая спектр одной фазы тока статора, должна основываться на контроле тех спектральных составляющих, на которые не влияют колебания момента нагрузки [14].

Джон С.Сюй в [15] предложил метод мониторинга таких дефектов, как эксцентриситет воздушного зазора, трещины в стержнях ротора и закороченные катушки статора в асинхронных двигателях. Крутящий момент воздушного зазора можно рассчитать во время работы двигателя. Никакого специального времени для измерения не требуется. Данные о крутящем моменте воздушного зазора двигателя периодически сохраняются для целей сравнения.

Хамид А. Толянт и др. в [16] разработали новую модель асинхронной машины для ис-

следования статического эксцентриситета ротора. Она основана непосредственно на геометрии асинхронной машины и физическом расположении всех обмоток. Модель может имитировать работу асинхронных машин во время переходных процессов, а также в установившемся режиме, включая эффекты статического эксцентриситета ротора.

Станислав Ф. Леговский и др. продемонстрировали, что мгновенная электрическая мощность, предложенная в качестве средства для анализа сигнатур асинхронных двигателей, имеет определенные преимущества перед традиционно используемым током. Характерная спектральная составляющая мощности появляется непосредственно на частоте возмущения, независимо от синхронной скорости двигателя [17].

Рэнди Р. Шон и Томас Г. Хабетлер представили метод устранения влияния момента нагрузки из спектра тока асинхронной машины [18]. Они обнаружили, что ранее представленные схемы мониторинга состояния на основе тока игнорируют эффект нагрузки или предполагают, что он известен. Следовательно, схема определения работоспособности машины при наличии изменяющегося момента нагрузки требует некоторого метода разделения этих двух эффектов. Это достигается путем сравнения фактического тока статора с эталонным значением модели, которое включает эффекты нагрузки.

М.Э.Х. Бенбузид и Х.Неджари и др. в указали, что профилактическое обслуживание систем электропривода с асинхронными двигателями включает в себя мониторинг их работы на предмет обнаружения аномальных электрических и механических условий, которые указывают или могут привести к отказу системы. Интенсивные исследовательские усилия в течение некоторого времени были сосредоточены на анализе характеристик тока двигателя. Этот метод использует результаты спектрального анализа тока статора [19].

В.Т.Томсоном представлена оценка методов оперативного мониторинга для обнаружения эксцентриситета воздушного зазора в трехфазных асинхронных двигателях. Опера-

тивный мониторинг тока предлагается как наиболее применимый метод в промышленных условиях [20].

Бирсен Язычи и Джеральд Б.Климан рассмотрели адаптивный частотно-временной метод для обнаружения поломок стержня и дефектов подшипников [21]. Показано, что частотно-временной спектр лучше раскрывает свойства, необходимые для обнаружения неисправностей, чем спектр Фурье в области преобразования. Метод основан на подходе обучения, при котором все различные нормальные режимы работы двигателя изучаются до начала реальных испытаний.

Джафар Милимонфаред и др. в [22] представили новый метод обнаружения неисправностей стержня ротора путем анализа напряжения, индуцированного статором после отключения сети. В этом методе несбалансированные временные гармоники не будут влиять на обнаружение. Также из характера испытания ясно, что его можно проводить даже на незагруженной машине. Гармонические компоненты, предсказанные теоретическим анализом, четко совпадают с результатами моделирования.

Бенбузид и др. исследовали эффективность спектрального анализа тока при обнаружении неисправностей асинхронных двигателей. Идентифицированы частотные характеристики некоторых асимметричных неисправностей двигателя, включая эксцентриситет воздушного зазора, поломку стержней, колебания скорости вала, асимметрию ротора и выход из строя подшипников [19].

Альберто Беллини и др. в [23] представили влияние контроля на поведение неисправной асинхронной машины. Диагностические индексы, обычно используемые для работы в разомкнутом контуре, больше не эффективны.

Йоксимовичем и Пенманом изучено взаимодействие между неисправной обмоткой статора и исправной клеткой ротора [24]. Показано, что неисправная асимметричная обмотка статора может создавать пространственные гармоники в поле воздушного зазора. Однако все эти гармоники изменяются на одной

частоте, т. е. частоте питания источника синусоидального напряжения.

Масуд Хаджи и Хамид А. Толият разработали метод распознавания образов, основанный на классификаторе минимальных ошибок Байеса, для обнаружения неисправностей сломанного стержня ротора в асинхронных двигателях в установившемся режиме. Предложенный алгоритм использует в качестве входных данных только ток статора без необходимости использования каких-либо других переменных [25].

Аркан и др. в [26] представили неинвазивный онлайн-метод обнаружения неисправностей обмотки статора в трехфазных асинхронных двигателях по наблюдению тока питания обратной последовательности. Метод степенного разложения (PDT) использовался для получения компонентов положительной и обратной последовательности измеренных напряжений и токов.

5. БЫСТРОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ (БПФ)

БПФ - это метод обработки сигналов для обнаружения неисправностей асинхронного двигателя. Хотя дискретное преобразование Фурье (ДПФ) является наиболее простой математической процедурой для определения частотного содержания последовательности во временной области, оно ужасно неэффективно. Когда количество точек в ДПФ увеличивается до сотен или тысяч, объем необходимой обработки чисел становится чрезмерным. В 1965 году была опубликована статья, описывающая очень эффективный алгоритм реализации ДПФ. Этот модифицированный алгоритм теперь известен как быстрое преобразование Фурье. БПФ - это просто эффективный в вычислительном отношении способ расчета ДПФ. Используя периодичность синусов, которые умножаются для выполнения преобразований, БПФ значительно сокращает объем необходимых вычислений.

Обзор литературы показывает, что тепловой мониторинг, мониторинг вибрации, а также электрический мониторинг, мониторинг

шума, крутящего момента и контроль магнитного потока являются важными методами мониторинга состояния и диагностики неисправностей электрических машин. В настоящее время более популярным методом является электрический мониторинг, в котором дополнительных датчиков не требуются. Это связано с тем, что основные электрические величины, связанные с электромеханическими установками, такие как токи и напряжения, легко измеряются путем подключения к существующим трансформаторам напряжения и тока, которые всегда устанавливаются как часть системы защиты. В результате данный мониторинг не является интрузивным и может даже осуществляться в центре управления двигателем удаленно от контролируемых двигателей.

ВЫВОДЫ

Представлен обзор существующих методов мониторинга состояния асинхронных двигателей. Обзор охватывает различные темы, методы и подходы: типы неисправностей асинхронных двигателей и практическое использование различных методов мониторинга состояния для диагностики неисправностей электрических машин. Показано, что предложенные ранее методы диагностики неисправностей электрических машин до сих пор остаются неисследованной областью. Использование электродвигателей растет в самых разных отраслях промышленности и транспорта, поэтому потребность в надежных методах обнаружения неисправностей электрических машин возрастает.

1. P.C.Krause. *Analysis of electric machinery*, New York: McGraw-Hill, (1986).
2. P.C.Sen. *Principles of electric machines and power electronics*, John Wiley and Sons, (1989).
3. J.Robinson, C.D.Whealan, N.K.Haggerty. *Trends in advanced motor protection and monitoring*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **40** (2004) 853- 860.
4. IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems, IEEE Std. 493-1997 [IEEE Gold Book], Appendix H.
5. P.F.Allbrecht, J.C.Appiarius, R.M.McCoy, et al. *Assessment of the reliability of motors in utility applications - updated*, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **1** №1 (1986) 39-46.
6. P.Vas. *Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines*, Clarendon Press Oxford, (1993).
7. P.J.Tavner, J.Penman. *Condition monitoring of electrical machines*, Hertfordshire, England: Research Studies Press Ltd, ISBN: 0863800610, (1987).
8. P.H.Mellor, D.Roberts, D.R.Turner. *Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design*, *IEEE Pro. Electric Power Application*, **138** (1991) 205-218.
9. J.S.Hsu. *Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **31** (1995) 1016-1021.
10. A.J.Ellison, S.J.Yang. *Effects of rotor eccentricity on acoustic noise from induction machines*, *Proceedings of IEE*, **118** № 1 (1971) 174-184.
11. R.R.Schoen, B.K.Lin, Th.G.Habetler, J.H.Schlag, S.Farag. *An unsupervised, on-line system for induction motor fault detection using stator current monitoring*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **31** (1995) 1280-1286.
12. R.Schoen, T.G.Habetler. *Effects of time-varying loads on rotor fault detection in induction machines*, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, (1993) 324-330.
13. R.Schoen, B.K.Lin, T.G.Habetler, JH.Schlag, S.Farag. *An unsupervised, on-line system for induction motor fault detection using stator current monitoring*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **31** (1995) 1280- 1286.
14. R.R.Schoen, Th.G.Habetler. *Effects of time-varying loads on rotor fault detection in induction machines*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **31** (1995) 900-906.
15. J.S.Hsu. *Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **31** (1995) 1016-1021.
16. H.A.Toliat, M.S.Aredeen, A.G.Parlos. *A Method for dynamic simulation of air-gap eccentricity in induction machines*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **32** (1996) 910-918.
17. S.F.Legowski, A.H.M.S.Ula, A.M.Trzynadlowsh. *Instantaneous power as a medium for the*