УДК 621.311

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСПЕРЕБОЙНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ ИСПРАВНОСТИ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Докт. инж. наук, доц. РОЛИК Ю. А., канд. техн. наук ГОРНОСТАЙ А. В.

Институт транспорта и связи (Латвия),
Белорусский национальный технический университет

Бесперебойность электроснабжения при работе ветроэлектростанции (ВЭС) в общей энергосистеме может быть обеспечена только высокой надежностью подсистемы распределения электрической энергии. Надежность подсистемы распределения электрической энергии ВЭС характеризуется рядом показателей и в общем виде определяется коэффициентом готовности [1], являющимся комплексным критерием, свидетельствующим о работоспособности и ремонтопригодности ее основных подсистем. Основные элементы подсистемы распределения электрической энергии ВЭС – высоковольтные масляные трансформаторы.

В структуре ВЭС (рис. 1) каждая отдельная ветроэнергетическая установка (ВЭУ) с целью минимизации потерь мощности нуждается в повышении генерируемого напряжения.

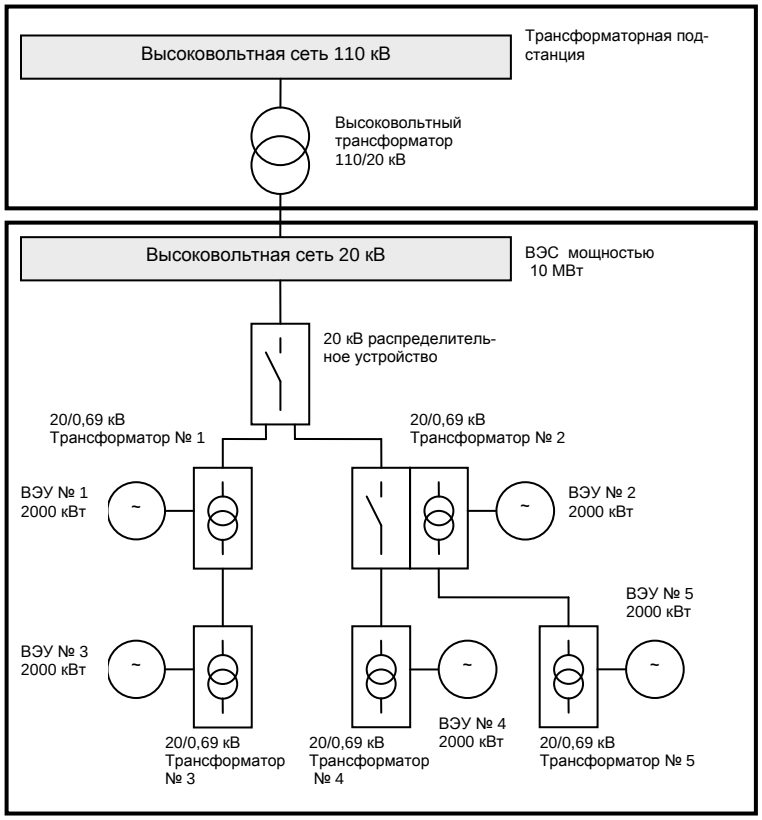

Рис. 1. Подсистема распределения электрической энергии ВЭС

Для этого в структуре ВЭС предусмотрено наличие повышающих трансформаторов по числу ВЭУ в составе электростанции. Поэтому в качестве одного из важных объектов контроля, влияющих на бесперебойность электроснабжения, необходимо проверять наиболее многочисленное оборудование ВЭС – масляные трансформаторы.

В настоящее время процесс контроля различного оборудования ВЭС включает в себя время поиска места и причин отказов, которое состоит в основном из времени восстановления и пока еще остается одним из факторов, влияющих на бесперебойность электроснабжения, которое требует его уменьшения. Последнее эффективнее всего достичь путем снижения времени поиска мест и причин отказов, т. е. совершенствуя существующие способы и средства контроля.

При разработке таких способов и средств контроля указанное затруднение преодолевают путем уменьшения времени поиска отказов. При этом либо ограничивают число контролируемых параметров [2], либо используют для контроля прогнозирующе-диагностические методы по обобщенному информационному параметру [3]. В данных условиях важным становится оптимальное определение обобщенного параметра для объекта контроля. Для этого первоначально необходимо проанализировать процесс контроля основных элементов выбранного объекта контроля – масляного трансформатора ВЭС.

Контроль масляных трансформаторов ВЭС. Существующие способы контроля масляных трансформаторов ВЭС основаны на непрерывном или периодическом контроле значений основных параметров, характеризующих их работоспособность, – напряжений, токов, мощностей, температуры верхних слоев масла, сравнении их с эталонными значениями и отключении трансформаторов при достижении критических значений параметров для выявления наступившего отказа.

Недостатком таких способов является то, что они построены только по принципу контроля работоспособности и не позволяют осуществлять контроль исправности, обеспечивающий прогнозирование отказов. Здесь под контролем исправности понимается определение такого состояния трансформатора, при котором он не соответствует основным требованиям, установленным для него нормативно-технической документацией. Другими словами, объект еще способен выполнять заданные функции, сохраняя в норме значения выходных параметров, характеризующих его работоспособность, но состояние входящих в него блоков или элементов может оказаться при этом предельным.

Предельное состояние элемента трансформатора – это такое его состояние, при котором дальнейшая эксплуатация трансформатора должна быть прекращена во избежание наступления отказов и аварий, требующих значительного времени восстановления. Так, для масляных трансформаторов как объектов контроля основными элементами являются: керн, обмотка, изоляция (витковая, линейная, масляная, воздушная), кожух, изоляторы, система охлаждения, средства защиты, контроля и управления. Перечисленные элементы в структурной схеме надежности соединены последовательно. Отказ любого из этих элементов ведет к потере работоспособности всего трансформатора. В свою очередь каждый блок трансформатора

состоит из отдельных элементов, отказ которых не всегда приводит к потере работоспособности трансформатора, но, как правило, к наступлению предельного состояния того или иного элемента.

Например, если на изоляторах появляются трещины, загрязнения с внешней или внутренней стороны, ухудшается контакт между выводом от обмотки и проходной шпилькой или между питающей шиной и шпилькой, то все эти дефекты не ведут к потере работоспособности трансформатора, но приводят к наступлению предельного состояния изоляторов (из-за отказа его элементов, например шпильки и т. д.). При этом трансформатор продолжает функционировать, но с предельным состоянием своего элемента. Последнее может привести к междуфазным коротким замыканиям на выводах и пробоям на корпус, т. е. к наступлению предельного состояния всего трансформатора, и т. д.

Таким образом, рассмотренные способы контроля определяющих параметров не позволяют своевременно выявлять приближение и момент наступления предельного состояния входящих в трансформаторы элементов. Указанные способы в этих условиях выявляют только предельное состояние всего трансформатора в целом и выполняют лишь защитные функции, т. е. отключают объект для предотвращения аварийной ситуации, но уже при наступившем отказе или аварии какого-либо элемента трансформатора. При этом требуется проведение дополнительного диагностирования трансформатора для выявления наступивших отказов. Все это увеличивает время пребывания ВЭС в неработоспособном состоянии и время восстановления, повышает трудоемкость обслуживания и не обеспечивает бесперебойность электроснабжения.

Поэтому необходимо выбрать такой обобщающий параметр, контроль которого позволил бы устранить указанные выше недостатки. Выбор такого параметра будем проводить исходя из анализа факторов, влияющих на качество функционирования масляного трансформатора.

Выбор обобщающего параметра для масляного трансформатора. Известно, что при эксплуатации трансформатора происходит старение его элементов, особенно это сказывается на сопротивлении изоляции. Факторов, влияющих на сопротивление изоляции, очень много. В общем случае сопротивление изоляции представляется функцией

$$R_{\text{из}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{у}}}, \qquad (1)$$

где $U_{\text{пр}}$ – приложенное напряжение; $I_{\text{у}}$ – ток утечки.

В свою очередь $U_{\text{пр}}$ зависит от тока нагрузки $I_{\text{н}}$ и времени работы t_r, а ток утечки $I_{\text{у}}$ – от коэффициента охлаждения $K_{\text{охл}}$ и угла диэлектрических потерь в изоляции $\text{tg}(\delta)$. Приложенное напряжение, ток утечки (1) и коэффициент охлаждения можно считать величинами слабо изменяющимися. При этом протекающий ток нагрузки $I_{\text{н}}$ определяет температуру нагрева обмоток трансформатора. Выделенное количество теплоты в этом

случае связано с потерями мощности трансформатора на нагрев следующей зависимостью:

$$Q_t = 0,24\Delta P = 0,72\left(I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2\right), \tag{2}$$

где I_1, I_2 – фазные токи в обмотках высокого и низкого напряжения; r_1, r_2 – фазные сопротивления постоянному току обмотки высокого и низкого напряжения.

Сопротивление обмоток трансформатора (2) с изменением температуры определяется по закону

$$r = r'\left[1 + \alpha\left(\nu - \nu'\right)\right], \tag{3}$$

где r – сопротивление обмотки при температуре ν; r' – то же при температуре ν'; α – температурный коэффициент.

Температура обмотки определяется по существующим номограммам в функции r/r'.

Температура обмотки трансформатора связана с сопротивлением следующей зависимостью:

$$\theta_{\text{обм}} = \frac{R_0(t) - R_x(t)}{R_x(t)}\left(235 + \nu_x\right) + \nu_x, \tag{4}$$

где $R_0(t)$ – сопротивление обмотки трансформатора в момент первоначального измерения (сразу после включения); $R_x(t)$ – то же в момент измерения при температуре ν_x.

Из (4) следует, что температура нагрева обмоток трансформатора определенным образом зависит от сопротивления этих обмоток.

Из анализа (1)–(4) следует, что в качестве непрерывно контролируемых параметров для высоковольтного трансформатора ВЭС подходят следующие: $R_{\text{из}}$ – сопротивление изоляции; $U_{\text{пр}}$ – приложенное напряжение; $I_{\text{н}}$ – ток нагрузки; θ – температура нагрева обмотки.

Связав между собой эти величины математической зависимостью, получим закон изменения обобщенного прогнозирующего параметра.

По аналогии с выражением (4) за вычетом температуры окружающего воздуха до наступления тепловой усушки и пробоя температура перегрева трансформатора в зависимости от сопротивления изоляции может быть представлена в следующим образом:

$$\theta_{\text{пер}} = \frac{R_{\text{из0}}(t) - R_{\text{изх}}(t)}{R_{\text{изх}}(t)}\left(235 + \theta_x\right) + \theta_x - \theta_{\text{окр}}. \tag{5}$$

Согласно (1) сопротивление изоляции $R_{\text{из}}$ прямо пропорционально приложенному напряжению $U_{\text{пр}}$ и обратно пропорционально току утечки $I_{\text{у}}$. В свою очередь $U_{\text{пр}}$, как было отмечено выше, в основном зависит от тока нагрузки $I_{\text{н}}$, определяющего температуру нагрева обмоток трансформатора $\theta_{\text{обм}}$. Поэтому полученная зависимость (5), связывающая между собой перечисленные выше параметры, дает право считать температуру перегрева

$\theta_{пер}$ обобщающим параметром контроля технического состояния масляного трансформатора ВЭС.

Практическая реализация способа контроля. Выбранный для контроля масляных трансформаторов ВЭС обобщающий параметр предусматривает необходимость использования для этих целей нетрадиционных преобразователей физических величин, участвующих в формировании результата контроля. Это обусловлено, прежде всего, тем, что в условиях высоких температур, сильных электрических и электромагнитных полей, взрывоопасности, электромагнитных помех и т. п. необходимо обеспечить в процессе контроля не только безопасность обслуживающего персонала, но и бесперебойность работы объектов контроля. В таких условиях важным также становится то, чтобы в процессе контроля было бы обеспечено отсутствие гальванической связи между объектом и средством контроля. Поэтому для этих целей необходимо подобрать такие датчики и преобразователи физических величин, которые использовали бы в своей работе сигналы той же природы, что и сами линии связи.

Этим требованиям в полной мере удовлетворяют волоконно-оптические датчики. Успехи в области волоконно-оптических линий связи привели к интенсивному развитию датчиков, использующих в своей работе как сами линии связи, так и оптическое излучение [4]. Предлагаемый способ контроля осуществляется с помощью таких датчиков, приведенных в тепловой контакт с соответствующими элементами масляного трансформатора [5]. В качестве таких элементов у масляного трансформатора выбраны обмотки высокого напряжения, обмотки низкого напряжения и масло.

Устройство контроля (рис. 2) масляного трансформатора [5] содержит реагирующий элемент, сигнальный элемент, отключающий элемент и оперативную цепь.

Реагирующий элемент выполнен в виде волоконно-оптических кабелей по числу контролируемых элементов трансформатора, блока светодиодов СД (СД1–СДN), блока фотоприемников (ФП) (ФП1–ФПN) и блока эталонных напряжений $U_э$. Все волоконно-оптические кабели своими концами подключены к входам блока светодиодов СД и через блок фотоприемников ФП к измерительным входам сигнального и отключающего элементов. Допусковые входы сигнального и отключающего элементов подключены соответственно к выходам блока эталонных напряжений $U_э$. Каждый волоконно-оптический кабель приведен в тепловой контакт с соответствующим контролируемым элементом масляного трансформатора, а один аналогичный кабель такой же длины располагается в масле в пространстве между кожухом и контролируемыми элементами.

Волоконно-оптические кабели являются чувствительными элементами устройства. Они реагируют на изменение температуры обмоток трансформатора и масла (изменяется интенсивность проходящего через них светового потока от соответствующих светодиодов СД). Количество таких кабелей определяется числом контролируемых элементов трансформатора (каждая обмотка высокого напряжения, каждая обмотка низкого напряжения, сердечник и т. д.). Кабель, свободно плавающий в масле, предназначен для непрерывного наблюдения за состоянием трансформаторного масла, которое стареет, меняет свою теплопроводность и т. п.

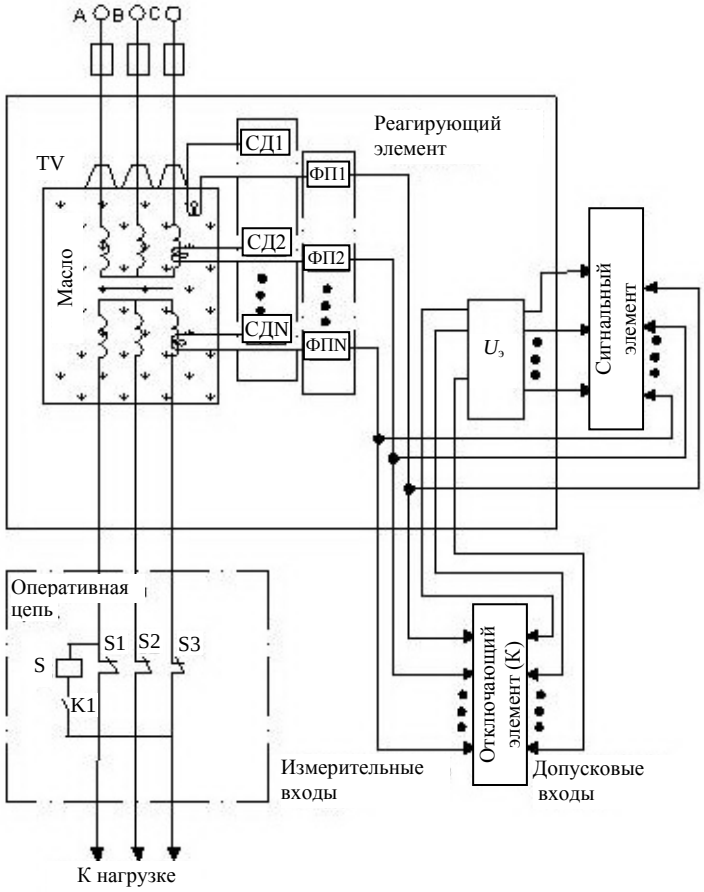

Рис. 2. Структурная схема устройства контроля ВЭС совместно с объектом контроля

Световые потоки в волоконно-оптических кабелях преобразовываются в электрические сигналы с помощью фотоприемников ФП и поступают на измерительные входы сигнального и отключающего элементов. На другие входы этих элементов подаются сигналы с блока $U_э$, соответствующие допустимым и аварийным уставкам на контролируемые параметры элементов трансформатора.

При исправном состоянии элементов трансформатора сигналы, поступающие на измерительные входы сигнального и отключающего элементов, равны сигналам, поступающим на допусковые входы этих же элементов с выхода блока $U_э$. В этом случае срабатывание сигнализирующего и отключающего элементов не происходит, что свидетельствует о нормальном функционировании элементов масляного трансформатора.

При возникновении незначительных повреждений контролируемых элементов масляного трансформатора температура их нагрева повышается, соответственно происходит нагрев волоконно-оптических кабелей, приведенных в тепловой контакт с контролируемыми элементами. Это приводит к уменьшению протекающих в них световых потоков по сравнению с нормальными режимами, а также к изменению выходных сигналов с блока фотоприемников ФП.

Достижение уровня сигнала, поступающего на измерительные входы сигнального и отключающего элементов от контролируемых элементов,

уровня сигналов предотказного состояния температуры на допусковых входах сначала фиксируется сигнальным элементом, что указывает на приближение соответствующего контролируемого элемента трансформатора к предотказному состоянию. При этом отключающий элемент не срабатывает, так как на его измерительные входы поступают те же сигналы с выходов блока фотоприемников, но они еще недостаточны для срабатывания отключающего элемента (на его допусковые входы в это время поданы сигналы, соответствующие аварийным состояниям температуры контролируемых элементов трансформатора).

При возникновении значительных повреждений элементов масляного трансформатора температура их нагрева и соответствующих волоконно-оптических кабелей повышается, сигналы на измерительных входах отключающего элемента от блока фотоприемников достигают уровня сигналов на допусковых входах, что указывает на аварийное состояние контролируемого элемента. При этом срабатывает исполнительный элемент К отключающего элемента, который своим замыкающим контактом К1 включает контактор S оперативной цепи, а он в свою очередь своими контактами S1–S3 отключает масляный трансформатор от нагрузки для предотвращения аварии.

ВЫВОДЫ

1. Предложен способ контроля масляных трансформаторов ВЭС, при котором в качестве обобщающего контролируемого параметра выбрана температура перегрева его элементов.

2. Разработано устройство контроля по выбранному параметру, позволяющее заблаговременно, оперативно и с высокой точностью выявлять предельные состояния элементов масляных трансформаторов, развитие в них скрытых повреждений и определять их места.

3. Предложенные способ и устройство контроля уменьшают время восстановления и обеспечивают бесперебойность электроснабжения ВЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. I n s t a l l a t i o n of wind Farms in Latvia with BRC 40–500 wind turbines / J. Roliks [et al.] // Proceedings of the International Seminar «Wind energy in Baltic» – Riga: LATVENERGO, 1996. – P. 36–40.

2. Р о л и к, Ю. А. Выбор параметров контроля технического состояния бесконтактного синхронного генератора / Ю. А. Ролик // Изв. АН Латв. ССР. Сер. физ. и техн. наук. – 1981. – № 5. – С. 11–15.

3. С п о с о б контроля распределительных устройств и устройство для его осуществления: а. с. 1718154 СССР / Ю. А. Ролик. – 1991.

4. R o l i k, Yu. The application of a nonlinear converter of electrical signals to the control of power systems / Yu. Rolik // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 1996. – No. 3. – P. 28–37.

5. У с т р о й с т в о температурного контроля масляных трансформаторов: пат. № 12029 Латвийской Респ. / Ю. А. Ролик. – 1998.

Представлена кафедрой
электроснабжения БНТУ

Поступила 30.10.2009