ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.51

М.В. Кипервассер, О.В. Инжелевская, Е.В. Пугачев

МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ОБОРУДОВАНИЯ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ

Работа узлов и агрегатов механического оборудования горнодобывающих предприятий сопровождается воздействием значительных механических нагрузок. В большинстве случаев эти нагрузки являются расчетными, но даже в этом случае их постоянное воздействие приводит к постепенному износу и в конечном итоге выходу механизма из строя по тем или иным причинам. Сами эти причины индивидуальны для каждого типа механизма и весьма разнообразны. Сложность и тяжесть повреждения определяет продолжительность простоя оборудования, затраты на ремонт, размер ущерба. Важно отметить, что в большинстве случаев технологические механизмы в течение рабочих периодов работают без постоянного наблюдения персоналом. Частичное наблюдение за работой обслуживаемого оборудования составляет менее 10%. По этой причине аварийные ситуации выявляются несвоевременно, а их характер определяется зачастую неверно, что увеличивает производственные потери. В этой связи своевременное и точное определение места и характера повреждения технологического оборудования являются актуальной задачей. В условиях отсутствия постоянного контроля работы оборудования обслуживающим персоналом, для определения неисправностей и аварийных ситуаций важно задействовать все имеющиеся возможности, в том числе и косвенные.

Рассмотрим работу воздушного турбокомпрессора как одного из основных механизмов, обеспечивающих технологический процесс подземного рудника по добыче железной руды. Этим термином определяется весьма сложный комплекс узлов и агрегатов, включающий в себя следующие звенья:

– воздушная нагнетательная турбина К-250 с воздухозаборниками, охладителями и выносными подшипниками;

– приводной синхронный высоковольтный электродвигатель мощностью 1600 кВт с высоковольтным включателем, системой возбуждения и автоматической релейной защитой;

– высокоскоростной повысительный редуктор;

– система принудительной смазки подшипников и редуктора.

В течение технологической смены указанные механизмы не обслуживается персоналом за исключением оператора, наблюдающего за всем комплексом оборудования компрессорной станции. Общая деталировка звеньев механической части компрессора содержит около 300позиций. Каждая из деталей может стать причиной поломки или аварии с теми или иными последствиями. В этой связи своевременное обнаружение аварийного режима, точная идентификация характера повреждения любыми доступными способами является актуальной задачей.

На практике для выполнения функций контроля рабочих аварийных режимов обычно выполняются с применением различных датчиков: температуры масла в подшипниках, температуры масла в редукторе; давления масла в подшипниках и редукторе. Общее количество датчиков достигает 15, что весьма усложняет принципиальную и монтажную схемы электрооборудования. Сами датчики конструктивно не надежные и контролируют ограниченное число параметров. Такое количество регистраторов по сравнению с количеством возможных причин неисправностей и отказов, явно не достаточно.

Воздушный турбокомпрессор К-250 является весьма мощной и энергонапряженной машиной. Частота вращения рабочего органа – воздушной турбины – составляет 11000 об/мин. Турбина приводится во вращение синхронным двигателем мощностью 1600 кВт через повысительный редуктор, так как скорость вращения двигателя 3000 об/мин не обеспечивает требуемую производительность. По причине значительных передаваемой мощности и частоты вращения валов, а также небольших размеров, режим работы элементов редуктора (ведущей и ведомой шестерней, подшипников), следует признать весьма тяжелым. По тем же причинам тяжелым является тепловой режим редуктора и подшипников. В этих условиях даже незначительные дефекты поверхностей зубьев шестерней редуктора, опорных подшипников, нарушение режима смазки трущихся поверхностей незамедлительно вызовут вибрационные явления, достаточно быстро приводящие к разрушению отдельных узлов и аварии агрегата в целом. Поэтому задача выявления подобных дефектов механической части весьма актуальна. К характерным неисправностям турбокомпрессора относятся следующие: осевой сдвиг вала турбины, не-

цилиндричность шейки валов, нарушение центровки валов, дефекты зубчатых соединений редуктора и соединительных муфт. Сложность обнаружения неисправностей (дефектов) обусловлена невозможностью визуального осмотра рабочих поверхностей зубьев и подшипников во время работы, а возникающие первоначально шум и вибрация малозаметны на фоне работающего компрессора. Контрольные датчики во время работы компрессора регистрируют давление и температуру масла в подшипниках, редукторе и маслостанции и ряд других параметров, информация о которых не может быть использована для обнаружения ненормальных вибраций. Контроль их визуально (органолептически), как уже говорилось, также затруднен.

В то же время вибрации элементов агрегата сказываются на электрических параметрах приводного электродвигателя. В характеристике скорости вращения ротора появляются высшие гармонические составляющие, обусловленные вибрациями. Известно, что расположенная на роторе синхронного двигателя обмотка возбуждения при вращении генерирует в каждой фазе обмотки статора электродвижущую силу (э.д.с.), величина которой описывается выражением:

$$E = l_e \cdot n \cdot \Phi, \qquad (1)$$

где n – частота вращения ротора;

Φ – магнитный поток обмотки возбуждения;

l_e – конструктивная постоянная, индивидуальная для каждого двигателя. Скорость вращения ротора синхронного двигателя, по определению, в нормальных условиях является неизменной (синхронной). В обмотке возбуждения магнитный поток неизменен и основная э.д.с. машины является постоянной.

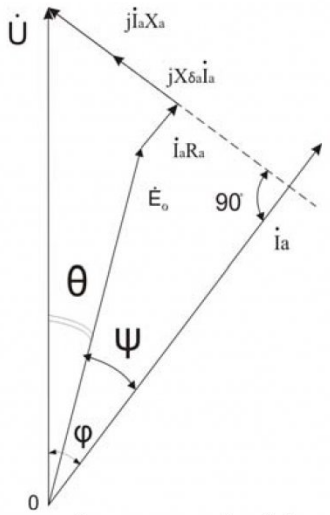

Рис. 1. Векторная диаграмма одной фазы обмотки статора

Векторная диаграмма одной фазы статора синхронного двигателя показана на рис. 1, где

$\dot{U}_c$ – вектор напряжения питающей сети;

$\dot{E}_a$ – вектор э.д.с., создаваемой обмоткой возбуждения;

$\dot{I}_a$ – вектор тока статора (якоря);

$jX_{\delta a}\dot{I}_a$ и $\dot{I}_a K_a$ – векторы падения напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях обмотки статора;

$jX_a I_a$ – вектор э.д.с. реакции якоря двигателя;

Θ – угол между вращающимся потоком статора и потоком обмотки возбуждения.

Неисправности механической части вызывают колебание момента на валу электродвигателя. Векторная диаграмма режима работы при этом меняется по двум причинам:

1. изменяется угол Θ из-за отклонения оси полюсов ротора от рабочего положения, соответствующего механическому моменту на валу;

2. изменяется величина э.д.с. в соответствии с изменением скорости вращения ротора.

При замедлении ротора величина э.д.с. уменьшается, а угол Θ – возрастает, что в итоге приводит к увеличению тока статора.

Величина механического момента на валу синхронного двигателя описывается известным выражением:

$$M = \frac{m \cdot E_o(I_b) \cdot \dot{U}}{X_a} \cdot sin\,\Theta. \qquad (2)$$

Комплексное изображение величины тока якоря запишется:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_c - \dot{E}_0}{R_a + jx_{sa} + jx_a}, \qquad (3)$$

где $\dot{U}_c$ – напряжение сети;

$\dot{E}_a$ – э.д.с. основного магнитного потока машины;

R_a – активное сопротивление обмотки якоря;

$X_{\delta a}$ – индуктивное сопротивление обмотки якоря;

X_a – индуктивное сопротивление реакции якоря.

Согласно выражения (3) и векторной диаграмме (рис. 1), модуль векторной разности $\left(\dot{U}_c - \dot{E}_0\right)$ в числителе будет зависеть от угла Θ и величины E_0, при условии, что величина напряжения сети принимается постоянной. Параметры в знаменателе выражения (3) также постоянны. Следовательно, контролируя величину тока якоря, можно косвенно судить о величинах э.д.с. и угла Θ, следовательно, и о величине мощности P и момента M синхронного двигателя.

Еще одним признаком, позволяющим судить о неисправностях в механической части, является частость возникающих отклонений тока статора, которая является различной в зависимости от места возникновения неисправности.

Место дислокации и характер неисправности	Величина отклонения тока статора	
	абсолютная, (А)	относительная, %
1. Нецилиндричность шейки вала двигателя и ведущей шестерни редуктора	3….4	1,5….2,1
2. Дефекты опорного вкладыша подшипника двигателя и ведущей шестерни редуктора	3….5	1,5….2,5
3. Дефекты поверхности зубьев шестерен редуктора	2….6	1,2….3,0
4. Дефекты вкладышей подшипников турбины и ведомой шестерни	6….9	3,0….4,5
5. Нецилиндричность шейки вала турбины	4….6	2,2….3,1
6. Нарушение центровки двигателя и редуктора	2….4	1,2….2,1
7. Нарушение центровки турбины и редуктора	3….6	1,5….3,0
8. Осевой сдвиг вала турбины	10….16	5,1….9,0

При разработке методики определения неисправностей учитывалось, что кроме внешних причин, э.д.с. двигателя может изменяться по ряду, внутренних причин для машины. К ним относятся пульсации э.д.с. из-за неравномерности воздушного зазора (зубцовые пульсации), изменение э.д.с. при регулировке тока возбуждения. Что касается тока в обмотке возбуждения, то э.д.с. при постоянной скорости пропорциональна магнитному потоку, который зависит от тока возбуждения согласно кривой намагничивания машины. На графике тока статора отражаются также колебания (отклонения) напряжения питающей сети. Очевидно, что все перечисленные помехи должны быть программно отфильтрованы перед изучением влияния токового сигнала на аварийные ситуации в механической части. Подобная фильтрация вполне возможна, если кроме тока статора контролировать сопутствующие параметры: напряжение сети и ток возбуждения.

Величины отклонений тока статора приводного электродвигателя от нормальных значений (в различных аварийных ситуациях) в абсолютных и относительных единицах показаны в таблице .

Реализация методики выявления аварийной ситуации механической части принципиально стала возможна с переводом устройств релейной защиты на базу микропроцессорной техники. Основным назначением этих устройств является разного рода защита электрических цепей двигателя и схемы его питания. К ним относятся максимально-токовая защита, токовая отсечка, защита от перегрузки цепи якоря, продольная дифференциальная защита статора, минимальная защита, другие защиты. Для выполнения основных функций микропроцессорные устройства релейной защиты с высокой, недоступной ранее точностью, фиксируют значения тока якорной цепи двигателя. Практическая точность замера в данном случае определяется точностью измерительных трансформаторов тока и потерями в линиях связи. Итоговая точность составляет 0,5% максимального значения измеряемой величины, что позволяет считать сигнал пригодным для обработки.

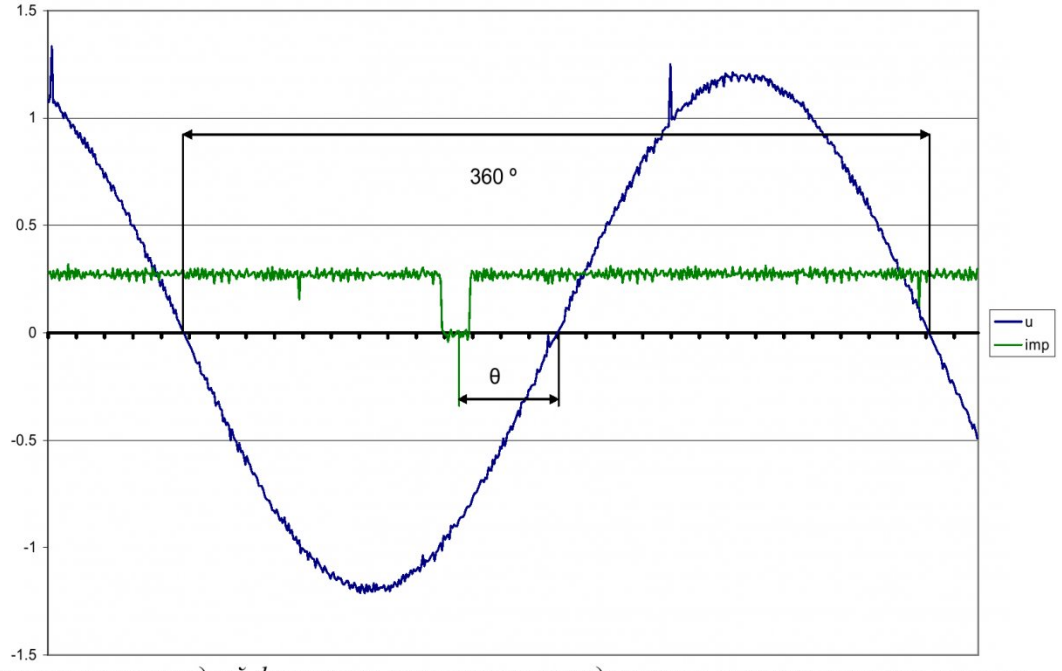

Рис. 2. Характеристики одной фазы тока статора электродвигателя в установившемся режиме

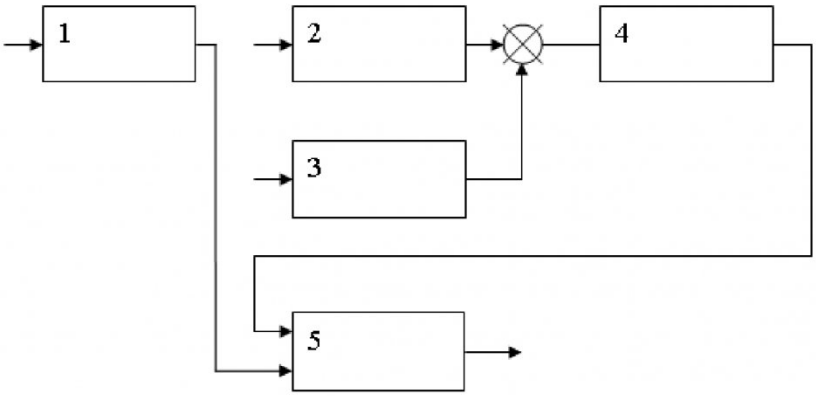

Рис. 3. Алгоритм работы схемы защиты

1. определение (замер) и хранение в памяти диаграммы тока статора в нормальном режиме работы;

2. замер текущих значений токов статора;

3. замер сопутствующих параметров: напряжения сети, тока в обмотке возбуждения;

4. выделение сигнала тока, соответствующего нормальному режиму работы для данных сопутствующих условий;

5. сравнение полученного сигнала с текущим значением тока статора.

Кроме высокой точности замера параметров микропроцессорные устройства защиты располагают серьезными вычислительными возможностями, которые могут быть расширены.

Режим работы турбокомпрессора после пуска можно считать установившимся (стационарным), а основные рабочие параметры электродвигателя (напряжение, ток статора, ток возбуждения, активная, реактивная и полная мощности) – постоянными. Пример синусоиды тока цепи статора в установившемся режиме (один период) показан на рис. 2., из которого видно, что коэффициент гармоник в данном случае составляет 1,0….1,5%. Имеющаяся весьма малая составляющая высших гармоник является следствием зубцовых колебаний магнитного потока. Подтверждением этого является частота колебаний (примерно 2000 Гц). Известно, что частота зубцовых колебаний э.д.с. определяется выражением:

$$f_з = f_1 \cdot z \cdot p,$$

где f_1 – основная частота э.д.с.;

z – число пазов на одно полюсное деление;

p – число пар полюсов на фазу обмотки статора.

Изображенную на рис. 2 характеристику тока статора можно считать неизменной в нормальном установившемся режиме работы до появления какой-либо из неисправностей, перечисленных в таблице, либо до отклонения величин напряжения сети или тока возбуждения.

Алгоритм работы предлагаемой схемы защиты представлен на рис.3.

Таким образом, контролируя достаточно точно измеряемые параметры высоковольтного электродвигателя, можно фиксировать на ранней стадии возникновение неисправностей в механической части агрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Галеркин Ю.Б., Козаченко Л.И.* Турбокомпрессоры. – СПб.: изд-во Политехнического ун-та СПб, 2008. – 374с.

2. Теория и расчет турбокомпрессоров. /Под общ. ред. К.П. Селезнева. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1986. – 391с.

3. *Копылов И.П.* Электрические машины. – М.: Высш. шк., 2009. – 607с.

4. *Гапоненко А.Ю., Пугачев Е.В., Кипервассер М.В.* Исследования работы автоматической системы регулирования возбуждения синхронного генератора в режимах повышенных нагрузок. // Вестник российской академии естественных наук (Зап. – Сиб. отдел.) : выпуск 12, Кемерово, 2010. С. 20 – 26.

Авторы статьи:

Кипервассер
Михаил Вениаминович,
канд.техн.наук, доцент, зав. каф. электротехники и электрооборудования, (Сибирский государственный индустриальный университет).
Тел. 8(3843)46-23-88

Инжелевская
Ольга Вениаминовна,
зав. лаб. каф. электротехники и электрооборудования (Сибирский государственный индустриальный университет).
Тел. 8(3843)46-23-88

Пугачев
Емельян Васильевич,
докт.техн.наук, зав. каф. электромеханики (Сибирский государственный индустриальный университет)
E-mail: pugachev_ev@em.sibsiu.ru