

ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

А. И. ЗАЙЦЕВ и Я. В. ПЕТРОВ

(Представлено проф. докт. техн. наук Балашевым И. А.)

Для ряда рудничных установок характерен продолжительный режим работы. К ним относятся, например, вентиляторные, насосные и компрессорные установки, стационарные конвейерные линии и некоторые другие. Отсутствие обслуживающего персонала в непосредственной близости от указанных установок в случае автоматизации их работы или сильный производственный шум при наличии персонала приводят к тому, что обрыв цепи фазы электродвигателя может длительное время не быть обнаруженным, в результате чего электродвигатель выходит из строя. В качестве примера можно привести частые случаи аварий по этой причине электродвигателей вентиляторов частичного проветривания „Проходка 500-2 м“: по данным ТЭМЗ, проводившего обследование работы этих вентиляторов, из общего числа выходов электродвигателей из строя на долю обрыва цепи фазы статора приходится 70%.

Продолжительная работа электродвигателей при оборванной фазе не может быть терпима, поэтому возникает необходимость отключения двигателя в случае обрыва цепи фазы. В вопросе защиты от однофазного режима работы трехфазных асинхронных электродвигателей в настоящее время нет единого мнения, о чем свидетельствуют многочисленные выступления в печати [1—4]. Рекомендованная Гипроуглемашем для некоторых рудничных установок схема защиты с помощью трех реле минимального тока, причем каждое из них имеет отдельный нормально открытый контакт в цепи управления магнитным пускателем [4], повидимому, не является наилучшей.

В свете сказанного представляет несомненный интерес сравнительная оценка известных, а также других возможных принципов защиты от однофазного режима работы трехфазных асинхронных электродвигателей.

При обрыве цепи одной фазы статора трехфазный асинхронный электродвигатель переходит в режим однофазной работы, для которого характерно следующее. Начальный пусковой момент (при $s = 1,0$) равен нулю, в результате чего двигатель не может самостоятельно раскрутиться. При номинальной нагрузке скольжение заметно возрастает, что приводит к увеличению частоты индуктированного в обмотках ротора тока прямой последовательности согласно выражению

$$f_{p_1} = fs,$$

где f — частота тока сети, s — скольжение.

При кратности максимального момента 2—2,5, характерной для рудничных электродвигателей, скольжение увеличивается в 1,9—1,2 раза [5].

Кроме того, в роторе индуктируется ток обратной последовательности, по величине приблизительно равный току прямой последовательности и имеющий частоту

$$f_{p_2} = f(2 - s).$$

При тех же условиях ток статора возрастает, примерно, в 1,8—2,0 раза. В таком же отношении возрастает и ток ротора. Следствием значительного увеличения тока является интенсивный нагрев электродвигателя, усугубляемый у двигателей с самовентиляцией ухудшением охлаждения. Наконец, при обрыве цепи фазы возникает несимметрия токов и напряжений, приложенных к фазам электродвигателя, причем в общем случае несимметрия токов более значительна, нежели несимметрия напряжений. Например, при соединении обмоток электродвигателя звездой и обрыве питающего провода создается несимметричная система токов с коэффициентом несимметрии, равным 1, при всех режимах работы электродвигателя, в то время как линейные напряжения электродвигателя образуют несимметричную систему, коэффициент несимметрии которой несколько превосходит нуль при холостом ходе электродвигателя и равен единице лишь при остановке двигателя ($s=1$). При нормальных нагрузках последний коэффициент заметно меньше 1 [6].

Принципиально возможно осуществить защиту от однофазного режима, используя явления:

- а) повышения скольжения (частоты тока в роторе);
- б) увеличения тока, потребляемого из сети;
- в) увеличения тепловых потерь в электродвигателе;
- г) исчезновения тока в одном из линейных проводов;
- д) несимметрии напряжений;
- е) несимметрии токов.

Эффективно действующая защита от однофазного режима должна удовлетворять следующим требованиям:

- 1) осуществлять избирательную защиту электродвигателя и питающего его кабеля при обрыве фазы в любой точке рабочей цепи;
- 2) срабатывать при различных нагрузках электродвигателя и схемах соединения его обмоток;
- 3) обеспечивать достаточно малое время срабатывания (не более нескольких минут);
- 4) давать минимальное число ложных срабатываний;
- 5) быть несложной по конструкции и уходу, иметь минимальное число подвижных частей, небольшие габариты и вес, унифицированные элементы для электродвигателей различной номинальной мощности.

Если указанные требования принять в качестве критерия при сравнительной оценке качеств различных принципов защиты от однофазного режима работы, то можно установить практическую целесообразность того или иного принципа защиты.

Защита, основанная на изменении скольжения (частоты тока в роторе)

Данный тип защиты может быть выполнен на тех же принципиальных основах, что и управление асинхронного или синхронного электродвигателя в функции частоты тока в роторе при его пуске. Осуществление защиты, реагирующей на частоту тока обратной последовательности, облегчается тем, что последняя значительно отличается от частоты тока прямой последовательности при работающем электродвигателе. При соответствующей конструкции реле частоты, включенного в цепь ротора, представляется возможным получить наиболее простую и надежную защиту от однофазного режима работы. Однако поскольку в угольной промышленности преимущественно применяются электродвигатели с короткозамкнутым ротором и впрямь область

их применения будет расширяться, следует считать, что данный принцип защиты практического значения не имеет.

Максимальная токовая защита

Имея в виду явление значительного возрастания тока в питающих электродвигатель проводах при обрыве цепи одной фазы, можно было бы в ряде случаев рассматриваемую защиту осуществить с помощью плавких предохранителей или реле максимального тока.

Действительно, если выбрать плавкую вставку предохранителей по номинальному току двигателя, применив инерционные плавкие предохранители или шунтировав обычные предохранители на время пуска, то при обрыве цепи фазы и номинальной или большей номинальной нагрузке электродвигателя возросший ток может расплавить вставку в течение достаточно малого времени: так, при кратности тока вставки, равной 2, время плавления вставки составляет около 2 мин. Однако уже при кратности тока 1,5 время плавления резко возрастает (до десятков минут). Учитывая, что при нагрузках электродвигателя, меньших номинальной, время плавления вставки недопустимо возрастает, а также другие общеизвестные недостатки защиты с помощью плавких предохранителей, мы должны признать, что защита от однофазного режима работы с помощью плавких предохранителей не является надежной и не может рекомендоваться для практического применения.

Реле максимального тока, снабженное механизмом выдержки времени или шунтируемое при пуске электродвигателя, способно создать более эффективную защиту и в более широком диапазоне нагрузок трехфазного электродвигателя, так как уставка реле в этом случае может превышать номинальный ток электродвигателя согласно ПТЭУ лишь в 1,2 раза. Это же реле может также защищать электродвигатель с выдержкой времени от длительной перегрузки при 3-фазном режиме и мгновенно от коротких замыканий. Конструктивно реле для двигателей низкого напряжения могут выполняться по типу максимальных реле воздушных автоматических выключателей А-2000Н. Для высоковольтных двигателей указанные защиты могут быть осуществлены с помощью, например, реле ИТ-82 по схеме, показанной на рис. 1. Аналогичную защиту можно получить, если на время пуска шунтировать защиту, как это делается в ящиках РВНО-6.

Одним из недостатков защиты с помощью реле максимального тока является возможное ее бездействие при нагрузках, меньших номинальной, когда

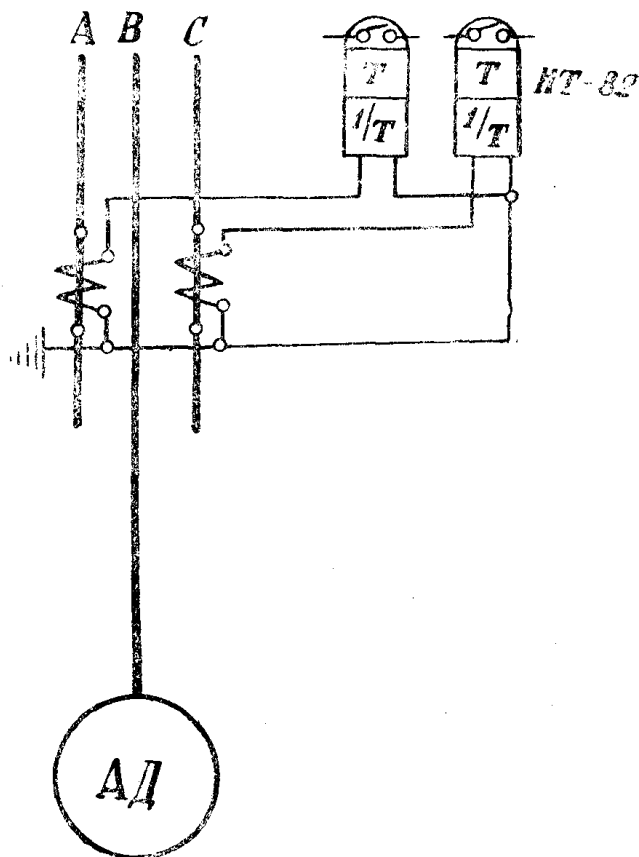


Рис. 1

через реле будет протекать ток, не достигающий тока срабатывания реле. Однако и нагрев двигателя при этом не превзойдет допустимые нормы, так как основные потери в двигателе—в обмотках статора и ротора будут создаваться лишь двумя фазами—при соединении обмоток статора в звезду, или тремя фазами—при соединении обмоток статора в треугольник, но в каждой фазе в последнем случае ток меньше номинального. Таким образом, такой однофазный режим не будет опасным для целостности изоляции поврежденного электродвигателя, и все же последний необходимо незамедлительно отключать от сети, так как присоединение к 3-фазной сети большой однофазной нагрузки вызовет заметную несимметрию напряжений сети, что приведет к быстрому перегреву изоляции обмоток других электродвигателей.

Этот недостаток защиты в меньшей степени относится к электродвигателям высокого напряжения, которые, как правило, достаточно загружены, питаются от сети большой мощности, а их защиты содержатся в лучшем состоянии; к тому же вероятность обрыва цепи фазы здесь невелика. Поэтому для электродвигателей высокого напряжения не следует применять специальной защиты от однофазного режима работы, так как такая защита вполне обеспечивается токовой защитой от перегрузок.

Применительно к двигателям низкого напряжения указанный недостаток максимальной токовой защиты имеет большее значение, так как обрыв в цепи фазы при работе недогруженного двигателя здесь более вероятен, двигатели питаются от трансформаторов небольшой мощности и защиты их содержатся обычно в худшем состоянии. Кроме того, необходимо иметь в виду, что существующая рудничная аппаратура управления низковольтными двигателями в большинстве случаев не имеет реле максимального тока или, если и имеет, то без механизма выдержки времени. Встройка реле с механизмом выдержки времени или только последнего в существующие аппараты управления представляется невозможной, а некоторая сложность конструкции механизма выдержки времени и ожидаемая малая его надежность в условиях шахты, делают применение его вообще проблематичным.

Из вышеизложенного следует, что защита от однофазного режима с помощью реле максимального тока в условиях шахт не обеспечивает полной надежности, является достаточно сложной и не может быть рекомендована для электродвигателей низкого напряжения.

Тепловая (температурная) защита

Защита с помощью правильно выбранного и отрегулированного теплового реле, имеющего надлежащий уход в эксплуатации, удовлетворяет почти всем требованиям к защите от однофазного режима, изложенным выше. Разброс защитных характеристик реле, вызываемый колебаниями температуры окружающей среды и несовпадением тепловых режимов реле и электродвигателя, повидимому, существенного значения в данном случае не имеет, так как рассматривается продолжительный режим работы электродвигателя. Этот недостаток тепловых реле к тому же может быть уменьшен, если встроить реле под оболочку двигателя (температурное реле). Необходимо лишь отметить, что в последнем случае число жил в кабеле возрастает на 1—2, усложняется эксплуатация реле и ремонт электродвигателя.

Однако тепловое (температурное) реле, как и реле максимального тока, не дает защиты от однофазного режима работы при нагрузках, составляющих часть номинальной, что, как указано выше, приводит к перегреву других электродвигателей.

Таким образом, тепловое реле, как надежная защита от однофазного режима работы, может быть рекомендовано для постоянно и хорошо нагруженных при работе электродвигателей при условии тщательного ухода за

реле. Для электродвигателей, могущих длительное время работать с недогрузкой (порядка 30—50 и более процентов), защита от однофазного режима тепловыми реле не может считаться эффективной.

Минимальная токовая защита

Подобная защита выполняется с помощью трех отдельных реле минимального тока, катушки которых включаются последовательно в цепь рабочего тока непосредственно или через трансформаторы тока. Защита должна быть отстроена от тока холостого хода электродвигателя и действует при исчезновении тока в цепи фазы на размыкание цепи управления магнитного пускателя. Примером такой схемы является схема Гипроуглемаша [4].

Представляется возможным сконструировать три реле с одним общим контактом и применить одни и те же реле для широкого диапазона мощностей электродвигателей, применяя общеизвестные способы изменения уставок реле. В таком виде защита удовлетворяет практически всем требованиям, указанным выше, за исключением частично пунктов 5 и 2, так как защитное устройство имеет относительно большие габариты и вес, много подвижных частей и не срабатывает при обрыве обмотки двигателя, соединенной в треугольник, когда токи протекают через катушки всех реле. В настоящее время у большинства рудничных электродвигателей обмотки статора соединяют в звезду, однако, при эксплуатации в будущем электродвигателей, пригодных для напряжений 660/380 в, значение последнего недостатка защиты может возрасти.

Минимальная токовая защита в сравнении с предыдущими видами защит является наиболее надежной, почему ее следует рекомендовать для практического применения там, где это требуется. Ввиду очевидной невозможности встраивания реле в оболочки серийных ПМЗ, необходимо изучить варианты размещения защитного устройства в корпусе рабочей машины или в отдельной взрывобезопасной оболочке. Оборудовать же каждый магнитный пускатель при его изготовлении такой защитой нецелесообразно.

Защита, основанная на применении фильтров обратной последовательности

При обрыве фазы трехфазная система превращается в однофазную, которая содержит симметричные составляющие прямой и обратной последовательностей. Составляющая нулевой последовательности отсутствует, поскольку нулевого провода не имеется.

Асинхронный двигатель, работая в однофазном режиме, становится фазообразователем, и напряжение прямой последовательности в оборванной фазе при холостом ходе достигает почти номинального значения и при полной нагрузке оно снижается до 0,8—0,9 от номинального. При получающейся незначительной асимметрии напряжений составляющая напряжения обратной последовательности будет изменяться также в небольших пределах и будет зависеть от загрузки двигателя. Поэтому строить защиту от однофазного режима на базе изменения составляющей напряжения обратной последовательности нецелесообразно, так как потребуются выполнение очень чувствительных реле и защита не будет работать при малых нагрузках и когда обрыв произойдет после защитного устройства. При наличии чувствительных реле напряжения обратной последовательности возможно также ложное срабатывание от имеющейся асимметрии при нормальном режиме.

Иначе дело обстоит с симметричной составляющей тока обратной последовательности. Коэффициент несимметрии, равный отношению симметричной составляющей тока обратной последовательности к симметричной составляющей прямой последовательности, при всех режимах работы

равен единице. Это значит, что обе составляющие всегда равны друг другу. Воспользовавшись этим обстоятельством, можно построить защиту, которая будет реагировать на обрыв фазы в любом месте. Для этой цели необходимо токовые реле подключать через фильтры обратной последовательности, широко применяемые в технике релейной защиты [7].

На рис. 2 представлена принципиальная схема управления электродвигателем с защитой от однофазного режима работы при использовании одного из известных фильтров тока обратной последовательности; в принципе можно составить большое количество разновидностей такой защиты. Параметры фильтра подбираются таким образом, что через реле защиты P протекает ток только обратной последовательности, возникающий при обрыве фазы. При этом нормально закрытый контакт P разрывает цепь управления и двигатель отключается.

Для того, чтобы через реле протекал только ток обратной последовательности, необходимо ток прямой последовательности скомпенсировать. Для этой цели обмотки трансформаторов тока включены по схеме, как это показано на рис. 2, а сопротивления Z_a и Z_c разворачивают векторы тока прямой последовательности фаз a и c на 60° . В результате эти векторы тока вычитаются, а точки ef на схеме по отношению тока прямой последовательности получают эквипотенциальными, и ток через обмотку реле протекать не будет. Таким образом, изменение тока прямой последовательности при любом режиме не вызовет срабатывания реле.

В отношении системы обратной последовательности потенциалы точек e и f не равны друг другу, а поэтому с появлением тока обратной последовательности реле срабатывает, и работа двигателя в однофазном режиме прекращается.

Определим параметры фильтра обратной последовательности, отвечающего вышеописанным свойствам. Для схемы рис. 2 ток, протекающий через реле

$$I_p = - \frac{Z_c}{Z_a + Z_c + Z_p} I_c - \frac{Z_a}{Z_a + Z_c + Z} I_a.$$

Симметричные составляющие тока в фазах

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} \\ I_b &= a^2 I_{a1} + a I_{a2} \\ I_c &= a I_{a1} + a^2 I_{a2}. \end{aligned}$$

Подставим значения токов в предыдущие уравнения

$$I_p = - \frac{Z_c(a I_{a1} + a^2 I_{a2}) + Z_a(I_{a1} + I_{a2})}{Z_a + Z_c + Z_p}.$$

Преобразуем полученное уравнение

$$I_p = - \frac{I_{a1}(a Z_c + Z_a) + I_{a2}(a^2 Z_c + Z_a)}{Z_a + Z_c + Z_p}.$$

Ток прямой последовательности через реле протекать не будет, если коэффициент при I_{a1} равен нулю.

Тогда

$$Z_c = - a^2 Z_a = Z_a e^{j60}.$$

В простейшем случае, приняв сопротивление Z_a чисто активным, получим, что сопротивление Z_c должно включать активную и индуктивную составляющие, причем вектор результирующего сопротивления должен быть повернут на 60° относительно вектора Z_a .

$$Z_c = R_a e^{j60}.$$

При выполнении указанных условий ток, протекающий через реле, будет пропорционален току обратной последовательности

$$I_a = \frac{Z_a + a^2 Z_c}{Z_a + Z_c + Z_p} I_{a2}$$

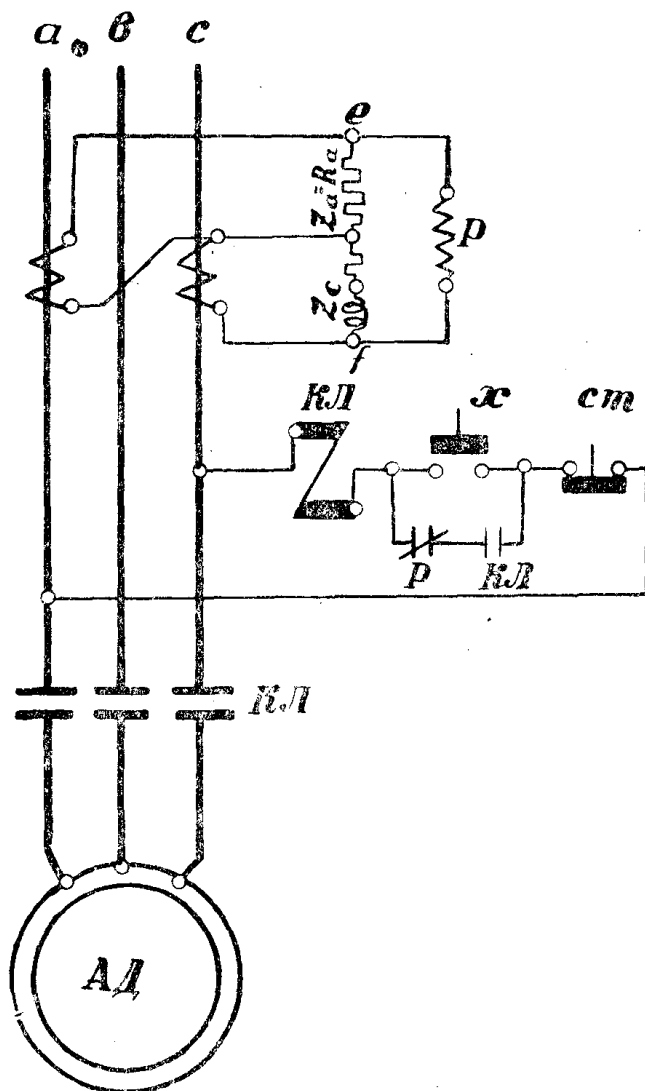


Рис. 2

Защита с использованием фильтров тока обратной последовательности отличается надежностью действия, простотой, минимальным числом реле и контактов, нечувствительностью к изменениям величины трехфазного симметричного тока. Кратковременное протекание тока через реле позволяет значительно уменьшить его размеры, а также использовать одно и то же реле для широкого диапазона мощностей электродвигателей при условии соответствующего выбора параметров остальных элементов защитного устройства (трансформаторов тока, сопротивлений Z_c и R_a). Ток трогания реле должен быть несколько больше тока небаланса при нормальном трехфазном режиме, когда допускается некоторая несимметрия системы напряжений.

Выводы

1. Надежным средством защиты асинхронных двигателей от однофазного режима следует считать токовую защиту, основанную на использовании токов обратной последовательности.
2. Защита с помощью трех токовых реле минимального тока, разработанная Гипроуглемашем, работает надежно за исключением случая обрыва обмотки статора, соединенной в треугольник.
3. Защитой от однофазного режима следует оборудовать установки низкого напряжения, работающие в длительном режиме. При повторно кратковременных режимах надобность в такой защите отпадает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зейлидзон Е. Д. Простой способ защиты электродвигателей от работы на двух фазах. Промышленная энергетика, № 8, 1951.
2. По поводу статьи инж. Е. Д. Зейлидзона „Простой способ защиты электродвигателей от работы на двух фазах“ (дискуссия). Промышленная энергетика, № 12, 1951.
3. Сыромятников И. А. О защите двигателей. Промышленная энергетика, № 5, 1952.
4. О защите электродвигателей от работы на двух фазах (дискуссия). Промышленная энергетика, № 7, 1952.
5. Халамейзер М. Б. Автоматическое отключение двигателей от сети при замыкании одной из фаз на корпус. Промышленная энергетика, № 8, 1952.
6. О защите электродвигателей от работы на двух фазах (дискуссия). Промышленная энергетика, № 10, 1953.
7. Гуров Е. М. Реле для защиты электродвигателей от работы на двух фазах. Промышленная энергетика, № 1, 1953.
8. О защите электродвигателей от работы на двух фазах (дискуссия). Промышленная энергетика, № 3, 1953.
9. Алямин В. В. Защита электродвигателей от работы на двух фазах. Рабочий энергетик, № 12, 1952.
10. Смоленский К. А. Защита электродвигателей от работы на двух фазах. Рабочий энергетик, № 5, 1953.
11. Сыромятников И. А. Основные вопросы релейной защиты и автоматики. Электричество, № 11, 1954.
12. Середняк А. Е. Защита трёхфазных электродвигателей от работы в однофазном режиме. Уголь, № 2, 1955.
13. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных двигателей, ГЭИ, 1950.
14. Бергер А. Я. и др. Асинхронный двигатель в аномальных режимах, ГЭИ, 1938.
15. Федосеев А. М. Релейная защита электрических систем, ГЭИ, 1952.
16. Вагнер К. Ф. и Эванс Р. Д. Метод симметричных составляющих, ОНТИ, НКТП, 1936.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
235	22 снизу	[1—4]	[1—12]
235	19 снизу	[4]	[12]
235	5 снизу	[5]	[13]
236	14 сверху	[6]	[14]
239	10 сверху	[4]	[12]
240	5 сверху	[7]	[15]
241	3 сверху	$Ia =$	$I_p =$