Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. LII, № 2, 1999, с. 193-199

УДК 621.316.925 **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

С.А. ШАХБАЗЯН, З.Т. ФИРУНЦ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАКСИМАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПОЛНЫЕ ТОКИ И ИХ СИММЕТРИЧНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ

Տրված են սովորական էլեկտրաշարժիչների առավելագույն հոսանքային և ֆիլտրային պրոտեկտությունների զգայունության բնութագրերը միաֆազ և երկֆազ միջգալվանային միացումների, ինչպես նաև ոչ լրիվֆազ աշխատանքային ռեժիմների ժամանակ: Ապացուցվում է, որ ֆիլտրային պրոտեկտությունների բարձր զգայունությունն ուղեկցվում է պրոտեկտության ժամանակի որակյալ փոքրացմամբ:

Даются сравнительные характеристики чувствительности простых максимальных и фильтровых токовых защит ЭД при одно- и двухфазных межвитковых к.з., а также при неполнофазных режимах работы. Доказывается, что высокая чувствительность фильтровых защит сопровождается качественным сокращением времени срабатывания.
Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

Comparative sensitivity characteristics for simple peak filter current motor protections in one- and two-phase interturn short circuits as well as in nontotal phase operating conditions are given. It is proved that high filter protection sensitivity is accompanied by quality reduction operation time.
Fig. 3. Table 1. Ref. 10.

Положение релейной защиты электродвигателей (ЭД) в настоящее время совершенно неудовлетворительно. Ущерб, обусловленный выходом из строя ЭД, весьма огромен [1] и определяется не только стоимостью восстановления самих ЭД, но и простоем оборудования, нарушением технологических циклов и пр.

Основным недостатком существующих максимальных токовых защит (МТЗ), использующих полные токи, является низкая чувствительность, не позволяющая им реагировать на такие опасные режимы работы ЭД, как межвитковые замыкания, технологические перегрузки, обрывы фаз, длительная работа при пониженном напряжении и т.д. Так, МТЗ мгновенного действия (отсечки), отстроенные от пусковых токов, являются малоэффективными с точки зрения выявления и своевременного отключения внутренних повреждений ЭД. Защиты же, действующие с выдержкой времени 15...20 с с уставкой (1,2...1,4)$I_{пуск}$, в качестве защиты от перегрузки не позволяют использовать перегрузочную способность ЭД, а в качестве защиты от внутренних коротких замыканий (к.з.) действуют недопустимо медленно.

Известно [2-4], что значительно лучшими показателями по чувствительности обладают фильтровые токовые защиты, реагирующие не только на величину, но и на фазовые соотношения

подводимых электрических величин, и действующие при к.з., обрывах фазы, межвитковых замыканиях, повреждениях роторных стержней, опрокидываниях ЭД и т.д. Этим и объясняется тот факт, что в ряде электротехнически развитых стран (США, Швеция, Англия) применение фильтровых токовых защит наряду с простыми токовыми защитами обязательно [5].

Ввиду многообразия максимальных токовых фильтровых защит (МТФЗ) ЭД необходимо для сравнения выбрать конкретную схему защиты, имеющую одинаково стабильную по чувствительности к симметричным и несимметричным повреждениям характеристику. Как показали исследования [2], этим требованиям наиболее полно удовлетворяет схема с использованием сдвоенного фильтра токов прямой и обратной последовательностей. Примером защиты такого типа является разработанная в Ереванском политехническом институте в 1980 г. схема защиты [3], прошедшая лабораторные испытания в ЕрПИ и промышленные испытания на ТЭЦ завода "Азовсталь" (г. Жданов) и на Разданском цементном заводе.

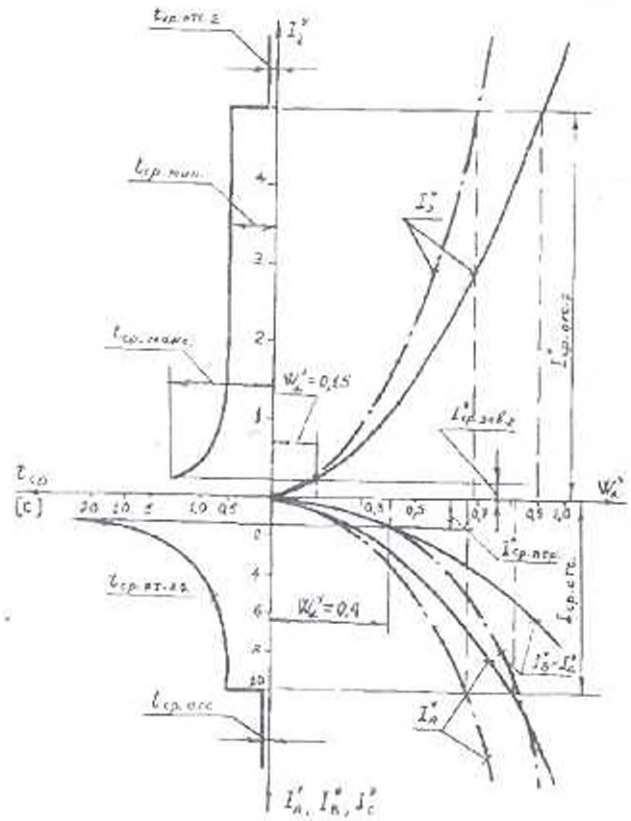

Рис.1. Сравнительные характеристики чувствительности МТФЗ (сверху от оси абсцисс) и МТЗ (снизу от оси абсцисс) при однофазных межвитковых к.з. на холостом ходу электродвигателя

В существующей литературе сравнение МТФЗ и МТЗ дается лишь при внешних к.з., тогда как большой интерес представляет сравнение этих защит при внутренних повреждениях ЭД. Так, в [6] оценка чувствительности МТЗ производилась при допущении, что сопротивления оставшейся в работе части обмотки и закороченной части пропорциональны числу витков. Кроме того, не учитывалась взаимоиндуктивная связь между частями обмоток поврежденных фаз [7], что объясняется отсутствием инженерной методики расчета симметричных составляющих токов внутренних повреждений ЭД для целей защиты.

В настоящей работе для выявления количественных показателей эффективности работы защит, использующих полные

токи, и фильтровых токовых защит по разработанной в [8] методике были подсчитаны токи внутренних повреждений на серии ЭД типа ДАЗО при одно- и двухфазных межвитковых к.з. в зависимости от количества замкнувшихся витков для двух граничных режимов: холостого хода и заторможенного ЭД. Полученные таким образом зависимости токов были затем сопоставлены с время-токовыми характеристиками соответствующих защит. Графо-аналитическим путем найдено минимальное количество замкнувшихся витков, при которых каждая защита действовала при заданном повреждении.

Для примера приведены сравнительные характеристики чувствительности МТФЗ и МТЗ при одно- и двухфазных межвитковых к.з. на холостом ходу работы ЭД (рис.1, 2).

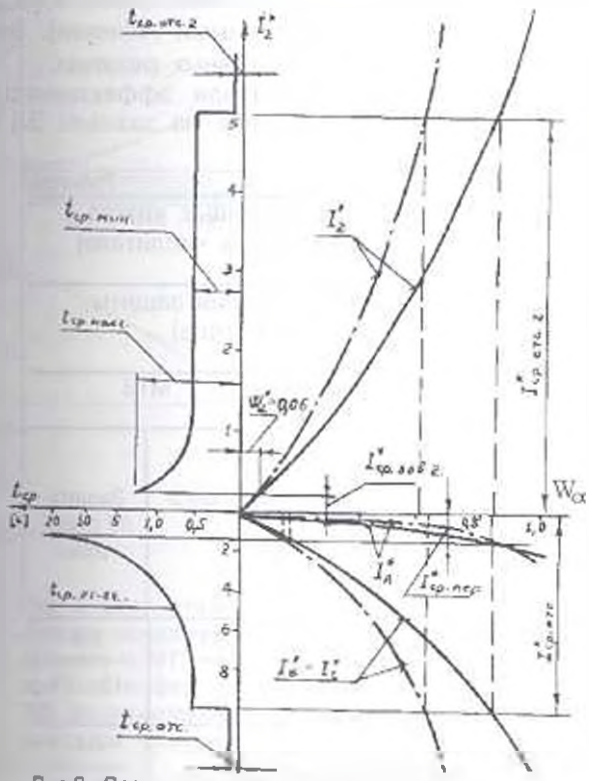

Рис 2. Сравнительные характеристики чувствительности МТФЗ (сверху от оси абсцисс) и МТЗ (снизу от оси абсцисс) при двухфазных межвитковых к.з. на холостом ходу электродвигателя

Здесь I_2^* - ток обратной последовательности в относительных единицах от номинального при одно- и двухфазных межвитковых к.з.; I_A^*, I_B^*, I_C^* - полные фазные токи в этих же единицах при названных повреждениях с учетом того, что при однофазных межвитковых к.з. повреждена фаза А, а при двухфазных - фазы В и С; $W_{\alpha}^* = W_{\alpha} / W$ - относительное количество поврежденных витков фазы ЭД в долях от полного количества витков.

Слева от оси ординат отложены время-токовые характеристики "органа отсечки" и "чувствительного органа обратной последовательности" [3] МТФЗ (сверху от оси абсцисс) и МТЗ, выполненной по двухфазной двухрелейной схеме, и защиты от перегрузки, выполненной одним реле, включенным на ток одной фазы (снизу от оси абсцисс).

Токи срабатывания защит приняты: отсечки МТФЗ по току обратной последовательности с целью отстройки от токов двухфазных к.з. на смежных ЭД $I_{сраб.отс} = K_{отс} I_{пуск} / 2$, где

$K_{зап}$=(1.5...2) - коэффициент запаса; $I_{пуск}$ - пусковой ток ЭД при кратности $K_п$=5; "органа отсечки" МТЗ - $I_{ср(отс)} = K_{зап} I_{пуск}$; защиты от перегрузки МТЗ с реле РТ-80 - $I_{ср(пер)} = 1.4 I_{ном}$; "чувствительного органа обратной последовательности" МТФЗ - $I_{ср(чувств)} = K_{зап} \varepsilon I_{ном} = 2 \cdot 0{,}1 \cdot I_{ном} = 0{,}2 I_{ном}$, где $\varepsilon = 0.05...0.1$ - коэффициент естественной асимметрии по току в сети в нормальном режиме работы ЭД.

Для создания более полной картины работы защиты в зависимости от условий подключения ЭД к сети были произведены расчеты токов внутренних к.з. ЭД и графо-аналитические исследования чувствительностей сравниваемых защит для случаев, когда в момент пуска ЭД напряжение на его зажимах равно $0{,}7U_{ном}$ (сплошными линиями) и $0{,}95U_{ном}$ (штрихпунктирными линиями). Это позволило охватить токи и при других промежуточных режимах.

Ниже приведены количественные показатели эффективности сравниваемых защит для случая, когда напряжение на зажимах ЭД в момент пуска равно $0.95U_{ном}$ (табл.).

Таблица

Вид повреждения и режим работы ЭД		Процент защищенных витков электродвигателя (в числителе) / Время срабатывания защиты (в знаменателе)			
		МТФЗ		МТЗ	
		Орган отсечки	Чувствительный орган обратной последовательности	Отсечка	Защита от перегрузки
Однофазные межвитковые к.з.	Режим холостого хода	31 / 0	88 / 0.5...2.5	33 / 0	64 / 15...20
	Пусковой режим	30 / 0	87 / 0.5...2.5	40 / 0	64 / 15...20
Двухфазные межвитковые к.з.	Режим холостого хода	40 / 0	95 / 0.5...2.5	30 / 0	85 / 15...20
	Пусковой режим	36 / 0	95 / 0.5...2.5	45 / 0	85 / 15...20

МТФЗ обладает также значительными преимуществами по сравнению с МТЗ и при неполнофазных режимах работы ЭД [9]. Как видно из зависимостей тока обратной последовательности и полного тока здоровых фаз (рис.3), при обрыве фазы от

относительной мощности на валу ЭД $P^* = P/P_{ном}$. P - мощность на валу ЭД; $P_{ном}$ - его номинальная мощность.

Сравнение характеристик показывает, что МТФЗ отключает ЭД при обрыве фазы вне зависимости от величины отдаваемой им мощности, в то время как защита от перегрузки МТЗ реагирует лишь при загрузке ЭД, превышающей 65% от номинальной мощности.

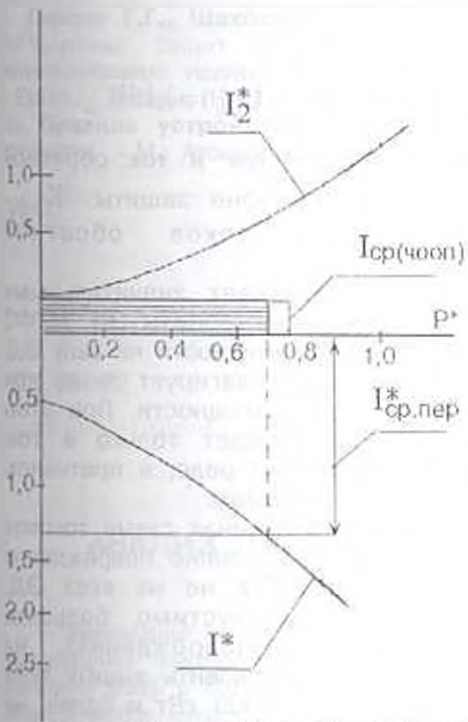

Рис. 3. Сравнительные характеристики функционирования МТФЗ (сверху от оси абсцисс) и МТЗ (снизу от оси абсцисс) при неполнофазных режимах работы ЭД. Заштрихованная зона- зона выигрыша чувствительности МТФЗ

Следует отметить, что при эксплуатации ЭД могут иметь место случаи, когда из-за неудовлетворительного состояния контактов, больших переходных сопротивлений мест соединения и т.д. возникает дуга не между отдельными фазами электроустановки, а вдоль какой-либо одной фазы. При этом ток в дуге не является током к.з., а определяется величиной нагрузки и не превышает тока нормального режима. Опасность этих замыканий состоит, прежде всего, в большой вероятности возникновения пожаров в месте горения дуги. Поэтому эти режимы подлежат немедленному отключению. В отличие от МТЗ МТФЗ на такие режимы реагирует, т.к. при этом нарушается симметрия линейных токов сети за счет повышения сопротивления дугового столба.

На основании приведенных данных можно сделать следующие выводы:

1. При однофазных межвитковых к.з. порог реагирования "чувствительного органа обратной последовательности" МТФЗ составляет 12...13% и более поврежденных витков. При наличии защиты от перегрузки [10] чувствительность МТЗ составляет 35...36%, если повреждение произошло на фазах без трансформаторов тока, и 20% на фазе с трансформатором тока. Чувствительность "органа отсечки" МТФЗ составляет 69...70% поврежденных витков. Чувствительность же отсечки МТЗ, если повреждение произошло на фазах с трансформаторами тока, составляет 60...67%, а на фазе без трансформатора тока - 85...90%.

2. При двухфазных межвитковых к.з. чувствительность фильтровых защит, составляющая 5% замкнувших витков, в 3 раза

выше, чем чувствительность МТЗ (15%). Благодаря этому МТФЗ защищает 95% витков, а МТЗ - 85%. Но главное преимущество МТФЗ заключается в том, что она действует с выдержкой времени 0,5...2,5 *с*, а МТЗ - 15...20 *с*.

Токовая отсечка МТФЗ в мощных промышленных сетях при к.з. на питающем кабеле и выводах ЭД на 15% чувствительнее к двухфазным к.з., чем отсечка МТЗ. Действительно, если коэффициенты чувствительности защит МТФЗ и МТЗ обозначить через $K_{чф}$ и $K_{чо}$ при двухфазных к.з. будем иметь

$$K_{чо} = I_к / (K_{зап} I_{пуск}),$$

$$K_{чф} = K_2 I_{2к} / (K_{зап} K_2 \cdot 0{,}5 I_{пуск}) = \frac{2I_к}{\sqrt{3}} / (K_{зап} \cdot I_{пуск}) = 1{,}15 K_{чо}.$$

Здесь $I_к$ и $I_{2к}$ - собственно полный ток и ток обратной последовательности при двухфазном к.з. в зоне защиты; K_2 - комплексный коэффициент фильтра токов обратной последовательности.

3. По сравнению с МТЗ, МТФЗ обладает значительными преимуществами и при неполнофазных режимах работы ЭД. МТФЗ реагирует на эти режимы вне зависимости от мощности на валу ЭД, в то время как защита от перегрузки МТЗ реагирует лишь при загрузке ЭД, превышающей 66% номинальной мощности. При этом срабатывание защиты от перегрузки произойдет только в том случае, если в оборванной фазе не подключено реле, в противном случае она вообще нечувствительна к этим режимам.

4. Учитывая, что даже двухфазная двухрелейная схема токовой отсечки МТЗ практически не реагирует на внутренние повреждения ЭД, а защита от перегрузки (устанавливаемая не на всех ЭД) обладает малой чувствительностью и недопустимо большим временем срабатывания при внутренних повреждениях, на двигателях мощностью до 5000 *кВт* следует установить защиту типа МТФЗ взамен МТЗ. На двигателях мощностью 5000 *кВт* и более, на которых согласно ПУЭ устанавливается дифференциальная защита, установка МТФЗ также обязательна в качестве защиты от однофазных межвитковых замыканий и обрывов фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Решения** Всесоюзного научно-технического совещания по защите электродвигателей переменного тока / Московское правление НТО энергетической промышленности. - М., 1975. - 3 с.
2. **Гимоян Г.Г.** Фильтровые токовые защиты асинхронных электродвигателей // Электричество. - 1972. - № 5. - С. 11-15.
3. **А.с.** 729729 СССР МКи[2] H02H7/08. Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от внешних, внутренних коротких замыканий и анормальных режимов / **Г.Г. Гимоян, Ш.А. Ароян, С.А. Шахбазян, К.А. Мирзоян** (СССР). - № 2158760/24-07. Заявлено 05.06.75; Опубл. 25.04.80, Бюл. № 15. - 4 с.
4. **Шахбазян С.А.** Фильтровые токовые защиты электродвигателей по сравнению с защитами, использующими полные токи // Электрические станции. - 1982. - № 11. - С. 61-62.

5. **Elmore W. A.** Motor protection in bok appliend protective relaying charten 7 // Wactinghause Electric Carparation Relay Instrument Division.- 1976. - P. 7-15.
6. **Клацель М.Я., Поляков В.И.** О чувствительности токовых защит электродвигателей // Электрические станции. - 1978. - №1. - С. 66-68.
7. **Ипатов П.М., Домбровский В.В., Цирлин Ю.Л.** Витковые замыкания в петлевых обмотках асинхронных машин // Вестник электропромышленности. 1962. - №7. - С. 36-43.
8. **Pytel J.** Methode zur Berechnung der Strome bei innenen Kurzschlussen in Ansinchronmotoren // Wissenschaftliche Zeitschrift der Elektrotechnik. -1966. - T.7, №2. - S. 80-104.
9. **Гимоян Г.Г., Шахбазян С.А., Азатян А.С.** Эффективность применения фильтровых защит электродвигателей по сравнению с защитами, использующими полные токи // Межвуз.темат.сб.науч.тр. Сер. Энергетика / ЕрПИ. - Ереван, 1976. - Вып.1- С. 12-21.
10. **Правила устройства электроустановок.** Раздел V. Электросиловые установки. - М.: Атомиздат, 1977. - С. 475-480.

ГИУА 19.04.1998

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. LII, № 2, 1999, с. 199-204.

УДК 681.32

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В.Г. ЯГДЖЯН

АНАЛИЗ ЛИНЕЙНОЙ СХЕМЫ С КОНЕЧНЫМ ЧИСЛОМ СОСТОЯНИЙ

Դիտարկվում է հետադարձ կապի մեխանիզմով ռեգիստրների ցիկլային տեղաշարժման պարբերության որոշման խնդիրը՝ կախված պրոցեսի վիճակի, հետադարձ կապի և հետադարձ կապի մեխանիզմի բազմանդամներից. Երկու մասնավոր դեպքերի համար (օղակաձև ռեգիստրի մեխանիզմով և առանց մեխանիզմի) որոշվում են ներքին վիճակի բազմանդամները՝ տրված պարբերությամբ: Ընդ որում, առանց մեխանիզմի օղակաձև ռեգիստրի համար խնդիրը համընկնում է ցիկլային հաջորդականությունների հայտնի խնդրի հետ:

Рассматривается задача определения периода циклического сдвига для регистров в зависимости от заданных многочленов внутреннего состояния, обратной связи и модификатора обратной связи. Для двух частных случаев (кольцевого регистра с модификатором и без него) определяются многочлены внутреннего состояния, имеющих заданный период. При этом для кольцевого регистра без модификатора задача совпадает с известной задачей циклических последовательностей.
Ил. 1. Библиогр.: 1 назв.

The problem of cyclic shift period determination for registers having a feedback modifier, depending on given polynomials of inner state, feedback and feedback modifier is considered. The polynomials of inner state, having the given period, are determined for two particular cases (ring register with and without a modifier). For a modifierless ring register the problem is identical to a well known task of cyclic sequences.
Ill. 1. Ref. 1.