

ПРИНЦИПИ ЗА ЗАЩИТА НА ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ И ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА ТЯХНАТА РЕАЛИЗАЦИЯ

Евтим Кърцелин¹, Динко Господинов¹, Румен Исталиянов¹, Йоана Младенова¹, Николай Лаков¹

¹ Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: el_emp@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Представена е сравнителна оценка на използваните принципи и на технически средства за реализация на защиты на асинхронни двигатели, обобщени са някои недостатъци на микропроцесорните защиты, обосновани са някои перспективни направления за усъвършенстване и разработване на нови видове защиты.

КЛЮЧОВИ ДУМИ : асинхронни двигатели, принципи и технически средства.

PRINCIPLES FOR PROTECTION OF ELECTRICAL MOTORS AND TECHNICAL METHODS FOR THEIR REALIZATION

Evtim Kartselin¹, Dinko Gospodinov¹, Rumen Istalianov¹, Ioana Mladenova¹, Nikolai Lakov¹

¹University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, e-mail: el_emp@mgu.bg

ABSTRACT. The publication contains comparative assessment of used principles and technical methods for achieving protection of asynchronous motors as well; some defects of micro-processor protections are summarized, and perspective directions intended to improve and elaborate new protections are motivated.

Keywords: asynchronous motors, principles and technical methods

ВЪВЕДЕНИЕ

Поради някои свой безспорни предимства асинхронният двигател е намерил днес широко приложение във всички сфери на човешката дейност. За повишаване на регулировъчните и икономическите показатели на асинхронните двигатели непрекъснато се разработват и внедряват различни видове силови преобразуватели на параметрите на захранващото напрежение: преобразуватели на честота, тиристорни регулатори на напрежение и др. Всичко това разширява и утвърждава лидерските позиции на асинхронния електродвигател в съвременните системи за електрозадвижване на различни производствени машини, механизми и процеси.

Заедно с това обаче трябва да се посочи, че асинхронният електродвигател, за разлика от други електрически машини, е твърде чувствителен към изменението на някои от основните показатели за качество на електрическата енергия (ПКЕЕ) и особено към колебанието, несиметрията, несинусоидалността и честотата на напрежението на захранващата мрежа. Например, при коефициент на несиметрия на напрежение с обратна последователност, равен на 0,05%, токът с обратна последователност достига до $0,25I_n$ и повече. Появата на ток с обратна последователност предизвиква увеличаване на резултатния ток и намаляване на въртящия момент на двигателя. За недопускане прегряване на намотките на двигателя е необходимо да се намали неговото натоварване.

Реалните експлоатационни условия се характеризират най-често не само с влошени ПКЕЕ, но и с влошаване на повече от един показател. Влошените ПКЕЕ оказват съществено отрицателно влияние не само на асинхронния двигател като обект на електроснабдяване и електро-механично преобразователно устройство за извършване на полезна работа, но и на апаратите за защита и автоматика.

В доклада е направена класификация и сравнителна оценка на използваните принципи и технически средства за защита на асинхронни електродвигатели, обобщени са някои недостатъци на микропроцесорните защиты, обосновани са перспективни направления за развитие на устройствата за защита на асинхронните електродвигатели.

Класификация на принципите и устройствата за защита на електродвигателите

Принципите за защита на електродвигателите от аварийни режими се определят от физическата природа на параметъра, който се измерва или контролира от датчика или от друг чувствителен елемент. По правило е прието да се контролира само един параметър, като на пример напрежение, ток в статорните намотки, температура, изолационно съпротивление на статорната намотка (или тока на утечката), и по-рядко на различни комбинации от тези параметри.

В тези устройства, които реализират принципа за защита по напрежение, чувствителният орган (фиг.1) реагира на

стойноста на фазното или на линейното напрежение, на напрежението между нулевата точка на три резистора, свързани в звезда (намотките на статора), и нустралата на мрежата, напрежение с обратна последователност, а също така и на последователността на редуване на фазите.

На този принцип са реализирани едни от най-елементарните устройства за защита от прекъсването на фазов проводник на основата на минимално напрежените релета. Чувствителен орган на релето се явява електромагнитен механизъм, който играе ролята на прагов елемент. В устройствата за защита от прекъсването на фаза и недопустимо ниво на асиметрия на захранващото напрежение, чувствителен орган се явява активно-капацитивен филтър на напрежение с обратна последователност (ФНОП). Тези релета реагират и на промяна на реда на фазите.

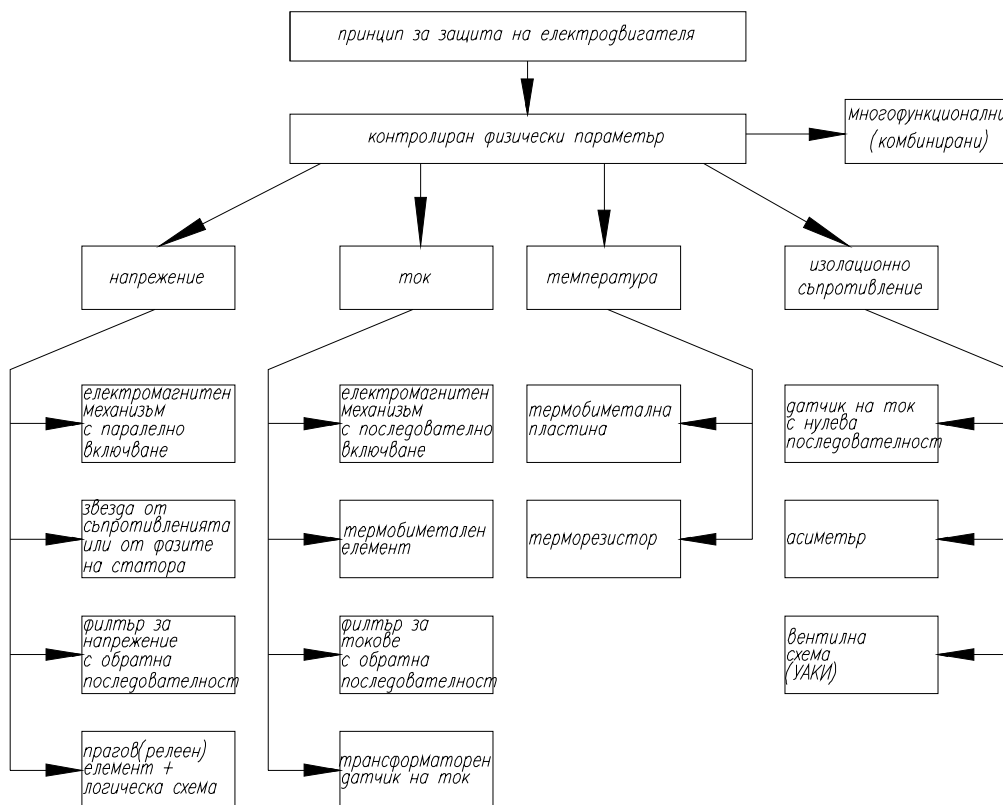
В редица комплектни устройства за управление релетата за контрол на прекъсването на фаза реагират и на големината на напрежението между нулевата точка на статорните намотки свързани в звезда и нустралния проводник.

Токовият принцип за защита се явява един от най-разпространените. Тук стойноста на тока се контролира от

различни видове датчици, който се включват последователно с фазата на статорната намотка на двигателя. Защитата от прекъсване на фаза, претоварване или от земно съединение се осъществява с помощта на минимално-токово реле. Както и при релетата за напрежения, и тук чувствителен орган се явява електромагнитен механизъм. По-голямо разпространение при токовите защиты са получили трансформаторните датчици на ток, при който изходното напрежение се изменя пропорционално на входния ток. Трансформаторните датчици на ток се явяват неразделна част на фазочувствителните устройства за защита тип ФУЗ. В токовите релета за ток с обратна последователност активно-капацитивния филтър за напрежение с обратна последователност също така се включва на изхода на трансформаторен датчик на ток.

Сравнително най-просто токовата защита се реализира в устройствата за топлинна защита, която се реализира с различни конструкции топлинни токови релета. Чувствителният орган при тези защиты представлява термобиметална пластина.

При температурния принцип защитата се осъществява чрез непосредствен контрол температурата на статорните намотки с помощта на различни датчици-сонди: терморезистори, термодвойки и миниатюрни биметални пластини.



фиг.1

Непосредственото измерване на изолационното съпротивление на статорните намотки в устройствата за защита практически не се използва. За стойноста на изолационното съпротивление се съди косвено, по стойността на тока на утечката. Като чувствителен орган за измерване на ток на утечката в електрическите мрежи с

глухо заземена нустрала, е възможно да се използва датчик на ток с нулева последователност, а в електрически мрежи с изолирана нустрала – с асиметър или вентилна схема [7,21].

По-голяма част от изброените вече устройства за защита се явяват еднофункционални, тъй като в тях се реализира

само един принцип за защита. Конструктивно такива устройства се явяват най-прости, с най-малка стойност и с най-висока надежност. В последно време започва серийното производство на комбинирани устройства, в които се реализират два или повече принципа за защита: за защита по напрежение и температура; за токова, температурна и защита по изолационно съпротивление; по напрежение и по ток.

Сравнителна оценка на различни видове устройства за защита

Принципът за защита асинхронни електродвигатели по напрежение, се използва широко в сравнително прости устройства, изпълняващи функциите за контрол на трифазно напрежение. На фиг.2 са представени различни структурни схеми на устройствата за защита, при които в качеството на чувствителен орган се използва напреженовото реле. Последното е възможно да бъде включено:

1. Между неутралната точка на статорните намотки, свързани в звезда и неутралата на мрежата „N“ (фиг.2а);
2. Между неутралната точка на свързани в звезда съпротивления „Z“ и неутралата на мрежата „N“ (фиг.2.б);
3. Между линейните проводници на захранващото напрежение (фиг.2.г).

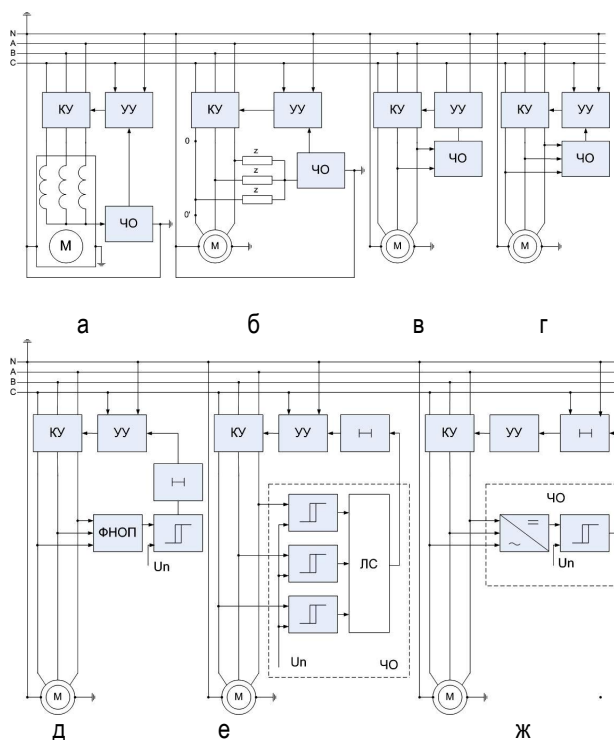
Изброените схеми позволяват да се контролира несиметрията на захранващото напрежение и прекъсването на една от фазите. Всички тези устройства притежават един и същи недостатък – работоспособността на устройствата зависи от точката на присъединяване на чувствителния орган. Например устройството на фиг.2.б реагира на прекъсване на фазите в точка „O“ и не реагира на прекъсване на същата фаза в точка „O“, тъй като при този случай звездата на съпротивленията се оказва под действието на симетричното напрежение на мрежата. Същите явления са характерни и за схемата на фиг.2.в, където напрежението се контролира от контакторното устройство за управление, включено между фазите В и С, и напреженовото реле включено между фазите А и В или от две напреженови релета, включени между фазите А - В и В-С (фиг.2.г).

По-чувствително към прекъсването на фазите се явява устройството, показано на фиг.2.а, тъй като то реагира на прекъсване във всяка точка на захранващата мрежа ниско напрежение, започвайки от вторичната намотка на трансформатора до намотката на двигателя, включвайки и последния.

По-нататъшното развитие на принципа за защита по напрежение е получил в разработването на специалните релета за контрол на трифазното напрежение. Структурните схеми на посочените релета са приведени на фиг.2.д, фиг.2.е и, фиг.2.ж.

Чувствителен орган на редица релета (фиг.2.д) се явява активно-капацитивен филтър за напрежение с обратна последователност (ФНОП) [15]. Напрежението на изхода на ФНОП се изменя пропорционално на изменението на

напрежението във всяка фаза на трифазна мрежа при неизменно напрежение в останалите фази.



Фиг.2: Структурни схеми на устройства за защита на електродвигатели по напрежение

На фиг. 2. са приети следните означения: КУ – комутационно устройство; УУ - устройство за управление, ЧО – чувствителен орган; ЛС – логическа схема

Една част от използваните днес устройствата за защита (фиг.2.д-ж), притежават многофункционалност, като контролират:

1. Прекъсване на фаза;
2. Асиметрия на захранващото напрежение с регулируемо ниво на чувствителност;
3. Последователност на редуване на фазите;
4. Симетрично понижаване на напрежението;

При наличието в схемите на блок за задръжка по време се осигурява възможност за изключване на лъжливи сработвания.

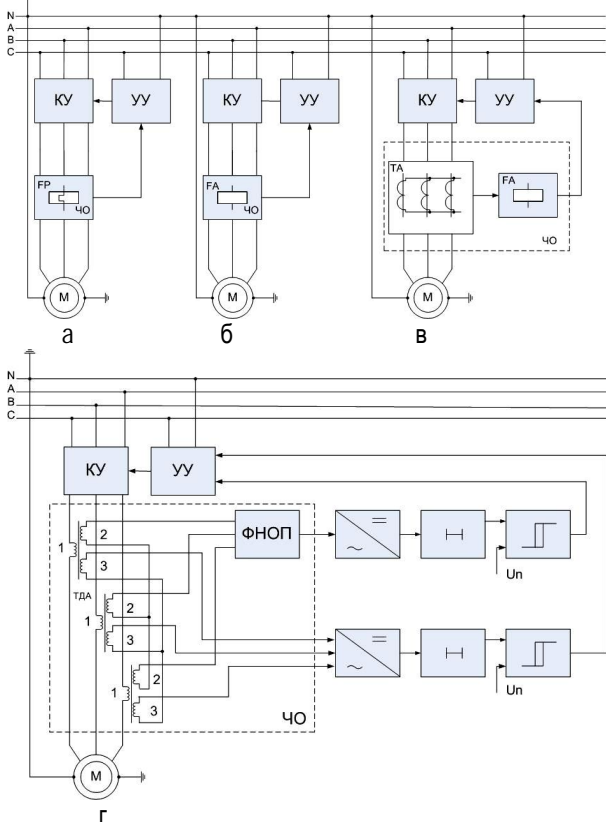
Тези устройства за защита притежават същите недостатъци, както устройствата, показани на фиг.2б-г, т.е. не реагират на прекъсването на фаза, ако прекъсването е възникнало след точката на включване на релето.

Освен това устройствата на фиг.2.а-б не реагират при прекъсване на фазата на страна високо напрежение на захранващия трансформатор. Това се обуславя от обстоятелството, че напрежението между неутралните точки на мрежата и звездата на статорната намотка или звездата на ротора е равно на нула. Устройствата на фиг.2.в-ж при този аварийен режим сработват, ако е възникнало „преобръщане на двигателя“ при условие, че роторът на двигателя се върти, посочените устройства се намират под действието на асиметрично напрежение на мрежата и на е.д.с., генерирана от двигателя. Степента на асиметрия на това

напрежение зависи от коефициента на натоварване на двигателя.

По-голяма част от електродвигателите, поради по-малък товар, при прекъсване на една от фазите не се „преобръщат“, а ще останат да работят. Степента на асиметрия на фазните напрежения не се проявява в достатъчна степен, при която е възможно сработването на вече описаните релета.

В токовите устройства за защита, показани на фиг.2, защитата контролира тока на една, на две или на всичките три фази на двигателя. Най-просто тази защита се осъществява с помощта на токови топлинни релета с биметални елементи (фиг.2.а). Топлинното реле обединява функциите на чувствителен орган, прагов елемент и на елемент за задръжка по време. В [16] се извършва подробно описание на предимствата и недостатъците на топлинните релета, методите за настройка, сравнението им с други устройства за защита.



Фиг.3: Структурни схеми на токови устройства за защита:

На фиг. 3. са приети следните означения:
 FP- термо биметална пластина ; FA- токово реле; ТА – токов трансформатор; ТДА – трансформаторен датчик на ток.

Защита на асинхронен двигател от претоварване, заклинване, прекъсване на фазите, пробив на фазите към корпус, е възможно да се осъществи с помощта на токовите релета. За първите три защиты е характерна една и съща структурна схема показана на фиг.3б. Защитата от симетрични претоварвания и заклинване на двигатели се реализира на базата на едно максимално токово реле, а защитата от прекъсване на фаза–на базата на три минималнотокови релета. Действието на защитата

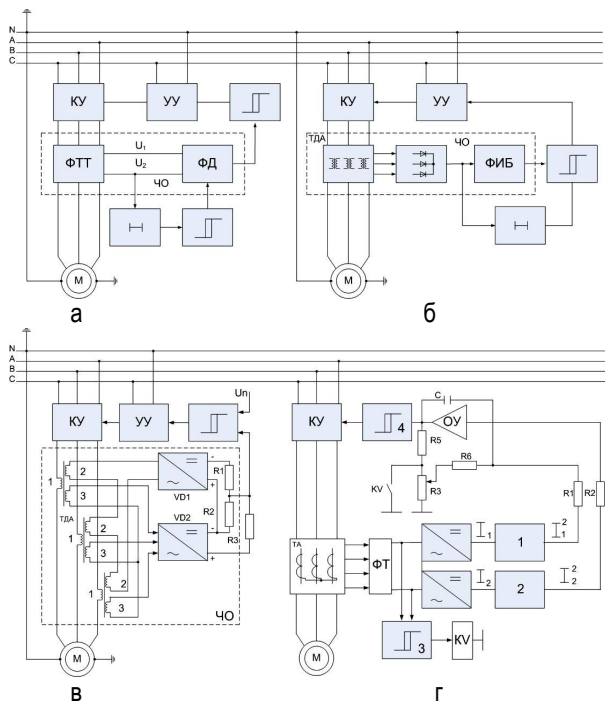
при пробив на фаза към корпус (земя) е основано на контрола на тока с нулева последователност с помощта на максималнотоково реле. В качеството на филтър за ток с нулева последователност се използват три токови трансформатора (фиг.3.в). При възникването на пробив между фаза и корпус, на изхода на токовия трансформатор ТА се появява ток с нулева последователност и релето FA сработва. Същата схема е възможно да се използва и за защита от прекъсване на фаза, ако се свърже неутралата на статорната намотка с нулевия проводник на мрежата. При симетричен режим на изхода на филтъра и в бобината на релето FA отсъства ток (ако се пренебрегнат хармониците от насищане). При прекъсването на която и да е от фазите на изхода на филтъра протича ток, релето FA се включва и със своя контакт подава команда на устройството за управление (УУ) за изключване на двигателя.

В устройствата за защита (фиг.3.б-в) токовите релета изпълняват функциите на чувствителен орган, на прагов релеен елемент и на изпълнителното устройство. Това обстоятелство затруднява повишаване надежността на защитата чрез въвеждането на така наречения коефициент на запас срещу лъжливо сработване при кратковременни токови удари, малката номенклатура на произвежданите токови релета и необходимостта в една схема да се използват до три релета, ограничават широкото разпространение на тази защита. По-нататъшно развитие дадения принцип е получил в устройствата за защита, показани на фиг.3.г, фиг.6.а÷г, където в качеството на чувствителен елемент се използват специални ТДА (трансформаторен датчик на ток), а в качеството на релеен елемент-полупроводникови прибори.

На фиг.4.а е приведена структурната схема на фазочувствително устройство за защита тип ФУЗ [19], което се произвеждат серийно в различни модификации. Характерна особеност на ФУЗ се явява наличието на специален ФТТ, който изпълнява функцията на датчик на ток, при който напрежението на изхода е приблизително пропорционално на входния ток и функцията на преобразувател на трифазния ток в двуфазен.

На фиг.4. са приети следните означения: ФТТ- фазозавъртащ токов трансформатор; ФД-фазов детектор; ФИБ-фазоимпулсен блок; ФТ-филтър на симетрични съставящи на ток; ОУ – операционен усилвател.

Ъгълът на фазово изместване между напреженията на двуфазната система U_1 и U_2 зависи от съотношението между броя на навивките на първичната намотка и обикновено се колебае в границите $75 \div 90^\circ$. Такава стойност на ъгъла се използва в симетричен режим на захранване. При прекъсване на една от фазите, първичните токове в другите две останали фази винаги ще бъдат еднакви по стойност и фазово изместени на 180° , независимо от схемата на свързване на статорната намотка на двигателя. Съответно, ще се измени и фазовия ъгъл между напреженията U_1 и U_2 (фиг.4.а), при което той ще стане равен на нула или на 180° в зависимост от



Фиг.4: Структурни схемик на токови устройства за защита.

посоката на навиване и свързване на вторичната намотка на ФТТ. Устройствата от тип ФЗУ защитават асинхронния двигател от прекъсване на фаза и претоварване. Информация за фазовия ъгъл между напреженията U_1 и U_2 постъпва на входа на пръстеновиден ФД с косинусна характеристика [19], а информацията за стойността на тока – на елемента за задръжка по време. В симетричен режим на работа и при ток на двигателя, по-нисък от номиналната стойност, на изхода на ФД напрежението е приблизително равно на нула. При прекъсване на една от фазите напрежението на изхода на ФД рязко нараства и праговия елемент (междинното реле) подава команда за изключване на двигателя от мрежата. При голяма стойност на симетричното претоварване или заклиняване на ротора след определено време на закъснение сработва втория прагов елемент който шунтира едното рамо на ФД и на изхода нараства напрежението, което води до сработването на първия праговия елемент.

Близки до принципа на работа на ФУЗ се явяват устройствата за фазоимпулсна защита [16], чиято структурна схема е показана на фиг.4б. С помощта на токовите трансформаторни датчици ДТА, включени във всяка фаза, се осъществява контрол на тока на двигателя. Напрежението на вторичните намотки на ДТА се изправя и постъпва на входа на фазоимпулсен блок ФИБ и на входа на елемента за задръжка по време. По канала „Изправител – ФИБ“, се осъществява защитата от прекъсване по фаза, а по канала „Изправител – елемент за задръжка по време“ защита от претоварване и заклиняване на ротора.

При симетричен режим на работа на двигателя в изправеното напрежение присъства постоянна съставяща и хармоници, кратни на три, а при двуфазен режим на работа – постоянна съставяща и хармоници кратни на две.

Фазоимпулсните устройства за защита не реагират на прекъснатата фаза, ако това е възникнало до точката на включване на два или няколко двигателя. В този режим изправеното напрежение не съдържа хармоници, кратни на две, тъй като през всичките три фази на двигателите протича ток и постоянната съставяща на напрежението на входа на ФИБ не се изменя съществено.

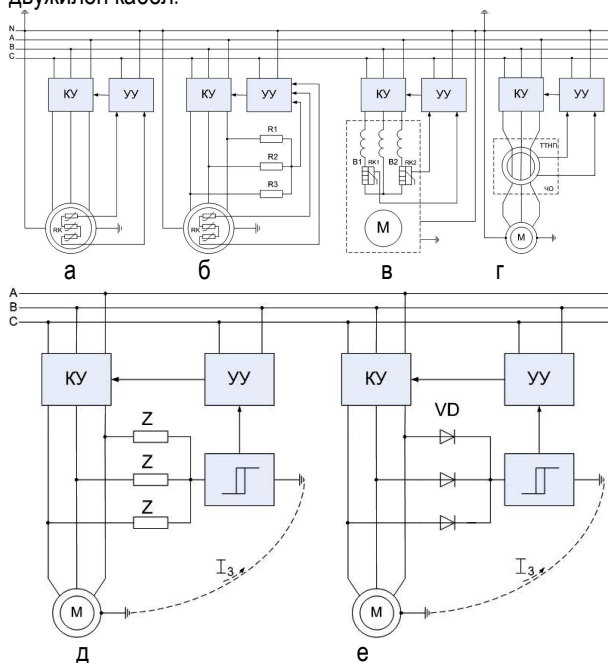
В устройствата, показани на фиг.4.в също така се реализира защита срещу прекъсване на фаза и срещу претоварване, но за разлика от ФУЗ и фазоимпулсните устройства, тук за организация на защитата от прекъсване на фаза се получава явлението насищане на магнитопровода на трансформаторните датчици на ток ТДА [16]. Както и устройствата показани на фиг.3.г, така и ТДА имат по две вторични намотки. Намотката 2 е свързана в открит триъгълник, свързан към първия изправител VD1, а намотките 3, свързани в звезда, са свързани с втория изправител VD2. Двата изправителя са включени паралелно и насрещно по отношение на резисторния делител $R_1 - R_2$. При симетричен режим на работа на двигателя, на клемите на намотката 2 на отворения триъгълник присъства напрежението на третия хармоник, генериран от трансформаторите ТДА. След изправяне това напрежение е приложено към делителя $R_1 - R_2$. Напрежението на изхода на изправителя VD2, пропорционално на тока на двигателя, е приложено към второто рамо на делителя $R_1 - R_2$ в обратна посока, и поради което напрежението на входа на праговия елемент е по-малко от U_n и той не реагира. При прекъсване на една от фазите на захранващото напрежение, третият хармоник се намалява до нула, а напрежението в средната точка на делителя $R_1 - R_2$ рязко нараства, състоянието на праговия елемент се изменя и на устройството за управление постъпва сигнал за изключване на двигателя от мрежата. Заклинването на ротора при симетричен режим предизвиква нарастване на статорния ток до неговата пускова стойност. Напрежението на изхода на изправителя VD2 нараства спрямо напрежението на изхода на изправителя VD1 в по-голяма степен, тъй като нарастването на напрежението на третия хармоник, поради насищането на магнитопровода е незначително при по нататъчно нарастване на токовете в първичните намотки на трансформаторите ТДА. Недостатък на разглеждания възел за защита се явява неговата чувствителност при малки стойности на претоварването.

Във всички разгледани токови защити реалното топлинно състояние на намотките на двигателя се моделира от тока във фазите. Ето защо такива защити следва да се отнасят към условните, тъй като в тях реални топлинни процеси се преобразуват на термични (термобиметал), електромагнитни или на електронен принцип. Идеалните устройства на токовите защити трябва да имат „време-токова“ характеристика, съпадаща с претоварващата характеристика на двигателя или да бъде незначително по-ниско от последната.

Такава защита е възможно да се разработи и създаде на основата на температурния принцип, при който топлинното състояние на двигателя се определя с помощта на температурни датчици-сонди, монтирани непосредствено в намотките на двигателя.

Най-добре тези изисквания се удовлетворяват от термисторите с положителен ТСК или от позисторите. Днес световно известни фирми произвеждат серийно позистори с различна класификационна температура $T_{кл}$, като по своите параметри съответстват на основните изисквания на МЕК [10].

В структурните схеми на температурните устройства за защита (фиг.5а+в) термисторите RK (най-често позистори) контролират температурата на статорната намотка. С цел по-точното определяне на тази температура, позисторите се монтират в челните части на всяка фаза, преди статорната намотка да бъде пропита с изолация и последващо изпичане. Всичките три позистора са свързани последователно, а информацията от тях постъпва на входа на устройството за управление УУ на двигателя по двужилен кабел.



Фиг.5: Структурни схеми на температурни устройства за защита (а,б,в) и на устройства за контрол съпротивлението на изолацията в електрически мрежи с глухо заземена неутрала (г) и в мрежи с изолирана неутрала (д,е).

УУ по същество представлява релеен блок с усилвател (полупроводников). Ако температурата на намотката на двигателя е по-висока от класификационната на позистора, настъпва рязко увеличаване съпротивлението на последния и на релеиния блок се подава сигнал за изключване на двигателя.

Температурната защита надежно изключва двигателя във всички аварийни режими, които водят до нагряване намотката на двигателя. Основен недостатък на този вид защита се явява закъснението на сработване при бързо нарастване температурата на намотките, например при режим на застопорен ротор или при пускане на двигател с прекъсната фаза. Температурната защита също така не сработва при прекъсване на фаза на електродвигател, работещ с малък товар. При този режим температурата на намотките на двигателя е по-ниска от допустимата, поради което двигателя не трябва да се изключва, но същественото нарастване на вибрациите води до механичното износване на изолацията. За отстраняването

на този недостатък в редица температурни защиты е въведен резисторен асиметър R_1, R_2, R_3 (фиг.5.б), които контролира симетричността на захранващото напрежение. При прекъсване на една от фазите устройството изключва двигателя практически без задръжка по време. За да се избегне възникването на закъснение при сработването на защитата при по-големи скорости на нарастване на температурата, се предлага да се компенсира динамичната грешка. Едно схемно решение за компенсация на динамичната грешка е показано на фиг. 5.в [20]. В тази схема позисторите RK1 и RK2 посредством специални накрайници са присъединени към нагревателите B1 и B2, през които протичат фазните токове на двигателя.

Принципът за защита на асинхронни двигатели, основан на контрола стойността на изолационното съпротивление на статорната намотка на двигателя спрямо корпуса се използва както в електрически мрежи с директно заземена неутрала (фиг.5.г), така и в електрически мрежи с изолирана неутрала(фиг.5д,е). В първия случай като чувствителен елемент се използва токов трансформатор с нулева последователност (ТТП). За първичната намотка на ТТП (фиг.5.г) се използват трите проводника на електрическата мрежа от която се захранва двигателя. Вторичната намотка е равномерно намотана върху сърцевината и се включва към изпълнителното реле на устройството за управление.

При нормално състояние на изолацията на статорната намотка на двигателя, геометричната сума на магнитните потоци, индуктирани в магнитната система на ТТП е равна на нула, следователно във вторичната намотка отсъства е.д.с. Намалването стойността на изолационното съпротивление (независимо по каква причина) спрямо корпус, води до появата на ток на утечка който се затваря (протича) по контура: фаза-изолационно съпротивление – корпус на двигателя-нулев проводник. Токът на утечка, който се явява ток с нулева последователност, създава в сърцевината на ТТП некомпенсиран магнитен поток, който индуктира е.д.с. във вторичната намотка. Този сигнал се използва за изключване на двигателя.

В електрически мрежи с изолирана неутрала непрекъснатия контрол на изолационното съпротивление на двигателя се осъществява по схемата, представена на фиг.5.д, с използване на токове с нулева последователност, с асиметър Z или по схемата показана на фиг.5.е чрез изправяне токовете на контролираната мрежа [17].

Избиране на контролируем (информационен) параметър за организация защитата от аварийни режими на асинхронни двигатели

От анализиранияте принципи и устройства за защита на асинхронни двигатели най-голямо разпространение е получил токовия принцип [14,15,23], който на практика се реализира от топлинни релета,автомати с комбиниран механизъм за изключване, ФУЗ и други устройства за защита. Контролираният параметър в дадените устройства се явява консумирания ток на двигателя. До този принцип се нарежда температурния принцип за защита. Сравни-

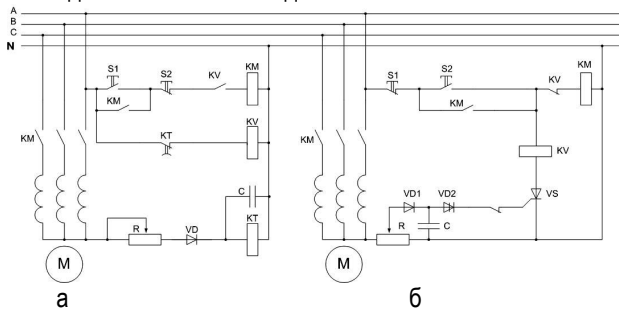
телно по-малко е разпространен принципа за защита по напрежение и съпротивлението на изолацията.

На основата на сравнителния анализ на различни устройства за защита е възможно да се твърди, че промишленото производство не произвежда универсални устройства за защита, приложими за нисковолтови асинхронни двигатели, използвани в различни отрасли на народното стопанство.

За асинхронни двигатели основно изпълнение, намиращи се по обективно определени условия за експлоатация на големи разстояния от пулта (шкафа) за управление (15m и повече), използването на температурния принцип за защита е затруднено поради необходимостта от полагането на проводници, които да свързват датчиците с релейния блок и които е необходимо да бъдат защитени от механични повреди и електромагнитни смущения.

Изброените обстоятелства определят задачата за търсене на нови пътища за усъвършенстване на принципите за защита по напрежение и ток. Това търсене на първо място следва да бъде насочено към откриването на контролируеми сигнали на напрежение, които се генерират от самия двигател. Такъв сигнал се явява напрежението между нулевата точка на статорните намотки и неутралата на мрежата. Използването на това напрежение в качеството на контролируем параметър е известно отдавна и успешно се използва в редица устройства за защита [17,21].

Като пример на фиг.6 са приведени два възела (елементи) от схемите на защитни устройства, в които се контролира напрежението с нулева последователност между нулевата точка на статорната намотка и неутралата "N" на мрежата. При прекъсване на една от фазите или при голяма асиметрия сработва релето за време „КТ“ (фиг.6.а) или се отпушва динистора "VD2" и тиристора "VS" (фиг.6.б), междинното реле "KV" подава команда за изключване на двигателя.



Фиг.6: Възел от схема на защитни устройства използващи напрежение с нулева последователност

Разликата между разглежданите възли се състои в организацията за реализиране на закъснението по време с цел изключването на лъжливо сработване при несинхронно включване (затваряне) контактите на контактора "KM". Във възела на фиг.6.а тази функция изпълнява релето за време „КТ“, а във възела на фиг.6.б, задръжката по време се осъществява с помощта на бутона "S2".

В публикация [16] се отбелязва, че устройството за защита по напрежение с нулева последователност (фиг.6) дава лъжливи сработвания.

Различни изследвания, включително и наши, показват, че напрежението U_0' между нулевата точка на намотките на двигателя и неутралата на мрежата в симетричен режим на захранване е действително възможно, но природата за неговото появяване следва да се приема не конструктивната асиметрия на двигателя, съгласно публикацията [16], а насищането на неговите магнитни вериги и зъбната структура на магнитопровода.

Доказва се, че за трифазен симетричен в конструктивно отношение асинхронен двигател при асиметрични захранващи напрежения между точките „O“ и "N" винаги ще бъде налице напрежение $U_{ON} = U_0^{\mu} + U_0^{Z^2}$, което се генерира от пространствените хармоници на насищане и зъбните хармоници на ротора, кратни на три.

Недостатъци на микропроцесорните защиты

Микропроцесорните устройства за релейна защита и автоматика (МПУРЗА) постепенно изместват традиционните електромеханични и електронни релейни защиты във всички области на енергетиката и електротехниката.

В рекламните проспекти и каталози на фирмите-производители на МПУРЗА (ABB, Simens, Ametek, General Electric, Alstom и др.) винаги се представя информация за предимствата, функционалните възможности и техническите характеристики на този тип защиты и не се посочва нито един недостатък. Тази модна тенденция по наше мнение въвежда в голямо заблуждение не само проектантите, но и научни работници, специалисти от експлоатационната и надзорна дейност. В потвърждение на казаното ще се посочи, че в [2] са изброени 19 предимства на МПУРЗА и не е посочен нито един недостатък.

Опитът от широкото използване на МПУРЗА в електроенергийните системи на Западна Европа и САЩ и обобщените резултати от тяхната експлоатация позволяват реално да се направи оценки не само за предимствата на тези устройства, но да се разкрият и посочат сериозни техни недостатъци.

В този доклад се представят само част от някои недостатъци на МПУРЗА:

1. За разлика от електромеханичните релета, които имат една зависима характеристика, изразяваща зависимостта на времето на включване от стойността на тока $t=f(i)$, микропроцесорните релейни защиты имат една независима характеристика и до 11 и повече зависими характеристики. Функцията $t=f(i)$ на зависимите характеристики се описват с математически формули, които удовлетворяват:

- стандартите на международната електротехническа комисия (МЕК);
- стандартите на ANSI/IEEE –използват се само от европейски производители;
- фирмени разработки.

Например, за микропроцесорно реле със зависими характеристики, изпълнено по стандарт на МЕК, зависимостта между тока и времето за сработване се представя със следната формула:

$$t = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1}$$

където t - време за сработване,
 k - коефициент на времето, ;
 I - текуща стойност на тока през релето, ;
 I_s - ток на който е настроено релето за сработване;
 α, β - константки които се дават в паспорта на релето от завода производител;

През етапа на проектиране и въвеждане в експлоатация на микропроцесорните релета възниква проблема за начина и метода за избиране на най-подходящата характеристика и изчисляване на настройката на защитата.

2. Микропроцесорните релейни защиты не изпълняват декларираната функция за осъществяване на пълна вътрешна самодиагностика на най-важните елементи на защитата [8]. Гарантирания от производителите вътрешен мониторинг за изправност на отделни възли и даже на част от най-важните елементи на микропроцесорните защиты в крайна сметка и по същество се оказва не повече от една реклама.

3. В предимствата на МПурЗА се посочво и по-високата им надежност в сравнение с електромагнитните релета, съдържащи механични подвижни елементи.

Количеството елементи на микропроцесорното реле са в стотици и даже хиляди пъти е по-голямо от количеството елементи на електромеханичното реле. А от теорията за надежност е известна обратно пропорционалната зависимост между количеството елементи и надежността на сложни системи [1].

4. Влияние от страна на захранващата мрежа върху функционирането на микропроцесорното реле.

В литературата са описани редица случаи на нарушаване (откази) и дори на повреди на микропроцесори от пренапрежения. Известно е например за масови откази на микропроцесорни релета за време, монтирани на атомни електроцентрали в САЩ. В информационния бюлетин, посветен на този проблем [12], се съобщава за повредите на такива релета от пренапрежения, възникнали при изключване намотките на междинни електромагнитни релета.

Както е било отбелязано, качеството на захранване на микропроцесорните устройства за защита има голямо значение. Ето защо на обектите в областта на енергетиката по правило, този тип защиты се захранват от мощни акумулаторни батерии с постоянно включени зарядни устройства или от източници за непрекъснато захранване (uninterrupted power sistem – UPS), които съществено смекчават негативното въздействие на гореизложените фактори. Освен това, изследванията на системите UPS показват [13], че при някои условия, по

заземителните вериги на микропроцесора проникват импулсни смущения и висши хармоници, от които не осигуряват защита нито системите UPS, нито филтрите. Освен това, UPS имат собствено време за превключване. Обикновено в техническата документация на производителите на UPS се посочва време за превключване в границите на 3-5 ms, но в действителност то може да се увеличава повече от 10 пъти [8].

Интересен е още един аспект на проблема: блокиране и откази в работата на собствения микропроцесор на системата UPS при аварийни режими в мрежите високо напрежение. Същото може да възникне и с автоматичните зарядни устройства, даже ако неговия собствен микропроцесор се захранва от външен спомагателен UPS. Такива нарушения нерядко възникват на практика, но анализът на техните причини засега все още никой сериозно не е изследвал [8].

5. Неадекватност на функциониране на микропроцесорните системи за релейна защита, особено на сложни (например дистанционни), при тежки аварии.

В реалните условия на експлоатация много често се наблюдава блокиране или неправилното действие на сложни микропроцесорни защиты, независимо от това, че при стендовото им изпитване в лабораторни условия при въздействие със стандартни сигнали на входа, те показват устойчива и надеждна работа. Проблемът се състои в това, че на един лабораторен стенд не е възможно да бъдат симулирани всички варианти на комбинации и възможно изкривяване на сигналите. Това е не възможно да се предвиди и при разработката на дадените микропроцесорни релета. А при експлоатацията на електромеханичните релета такива ситуации просто са изключени.

6. Възможни са ситуации, при които бързодействащите микропроцесорни защиты реагират на аварийни режими твърде забавено в сравнение с електромеханичните.

В редица енергосистеми за повишаване на надежността паралелно на микропроцесорните системи включват и електромеханични релета. При анализа на аварийните ситуации нееднократно се открива, че електро-механичните релета сработват и изключват прекъсвача, докато в същия случай микропроцесорното реле е успяло само да отреагира (само регистрира аварийната ситуация без подаване на сигнал за изключване на прекъсвача).

7. Съществени разлики във функционирането на електро-механичните и микропроцесорните релета, обусловени от тяхното различно възприемане на висшите хармоничните съставлящи на измерваните токове и напрежения, от наситането на токовите трансформатори и от други изкривявания на синусоидалната форма на входните сигнали.

В по-голяма част от микропроцесорните релета се използват цифрови филтри за бързото разлагане на кривата на входния ток в ред на Фурие и извличане само на основния хармоник [3]. Този процес е основан на така нареченото бързо преобразуване на Фурие (Fast Fourier Transformation – FFT).

Както е показано в [4], при такъв принцип на действие не се отчитат висшите хармоници на тока (напрежението), съставлящи значителна част от общия ток (напрежение) в

преходните режими, при аварии, при включването на мощни трансформатори, и т.н. В резултат микропроцесорните релета за диференциална защита и дистанционните релета реагират на входни сигнали по друг начин в сравнение с електромеханичните. А тъй като състава на хармониците и техните амплитуди са случайни (зависят от мястото и вида на късото съединение, режима на работа на мрежата и на други фактори), то използването на филтри, базиращи се FFT, се оказва недостатъчно ефективно.

8. Значителни усложнения при експлоатация на микропроцесорните релейни защиты.

Очевидно е, че за проверката и настройката на микропроцесорни защиты с помощта на компютър (или дори и без него) изисква високо ниво на подготовка на специалистите и голяма загуба на време. А що се касае до въпроса и задачата за търсенето на повреди и ремонт на такива устройства, то почти е невъзможно в експлоатационни условия.

9. Наличие на информационен излишък при микропроцесорните релейни защиты

При много от релета се предвиждат прекомерно много и с нищо неоправдани настройки. Тези "екстри" само усложняват и без това непростата процедура по тяхната настройка. Особено това се отнася за микропроцесорните релета със сложни функции (в частност, дистанционни) със стотици настройки.

10. Несъвместимост на микропроцесорните релета по някои особено важни параметри с мощно електроенергийно обзавеждане.

Обикновено в качеството на изходни изпълнителни елементи на микропроцесорните устройства за защита се използват миниатюрни електромагнитни релета или на оптронни полупроводникови, и дори на хибридни релета. Резултатите от проведените изследвания [6, 7] показват, че често стойността на техните параметри не съответстват на заявените (и задължително – в съответствие с изискванията на международните стандарти) стойностите на параметрите на микропроцесорното реле, в частта на удовлетворяване и издържане на изпитвателните напрежения и комутационни токове.

11. Възможност за преднамерени дистанционни въздействия на микропроцесорната релейна защита с цел нарушаване на нейната нормална работа [7, 8].

Въпросът за "електромагнитният тероризъм", способен да предизвика техногенни аварии и катастрофи с изключително огромни поражения и последици за една страна, включително с трансгранично влияние са формулирани в статията на Мануел Вика [9], където в частност, се отбелязва, че електронните елементи и компоненти, като микропроцесори, работещи на високи честоти, при ниско ниво на напреженията, са особено чувствителни към въздействието на външни преднамерени електромагнитни излъчвания.

Изводи

1. С разработването на нови силови преобразователни устройства специално за асинхронни двигатели (преобразователи на честота, тиристорни регулатори на напрежение и др.) при изключително ниска цена лидерските позиции на асинхронните двигатели се запазват и разширяват и през XXI век.
2. Науката и промишленото производство не осигуряват производството на универсални защитни устройства, приложими за защита на асинхронни двигатели, използвани в различни отрасли на промишленото производство и комунално-битовото обслужване.
3. Резултатите от многогодишната експлоатация на микропроцесорните релейни защиты в областта на електроенергетиката и електрониката показват редица недостатъци и нерешени проблеми.
4. Електромагнитната съвместимост на електро-обзавеждането, използвано в електроенергетиката ще бъде един от актуалните проблеми и задачи за изследване и решаване от научно-изследователските колективи през XXI век.
5. Разработването и внедряването на принципно нови защитни устройства за защита на асинхронни двигатели се явява актуална задача.

Литература

- Кърцелин Е., Количествена оценка за качеството на апаратите за защита на руднични подедни уредби, Науч. техн. конф. с межд. участие „Автоматика и информатика, 97“, България-София, сб. доклади, том 5, 1997, стр.91-94.
- Богданов Д.Х., Надежност на релейните защиты в АЕЦ, автореферат на дисерт. за получ. на образ. и научна степен „доктор“, 2009.
- Zocholl S.E., Benmouyal G. How microprocessor relays respond to harmonics, saturation and other wave distortion, Neta world, 2003, Summer.
- Nenel O.O., Onbilgin G., Kocaman C., Transformer protection using the wavelet transform, Turkish journal of electrical engineering & computer sciences, 2005, vol. 13, №1.
- Horak J., Pitfalls and benefits of commissioning numerical relays, Neta world, 2003, Summer.
- Gurevich V., Nonconformance in electromechanical output relays of microprocessor-based protection devices under actual operating conditions, Electrical engineering & electromechanics, 2006, №1.
- Gurevich V., The hazards of electromagnetic terrorism, Public utilities fortnightly, 2005, June.
- Gurevich V., Electrical relays: principles and applications., CRS press, USA, 2005.
- Wik M W., Electromagnetic terrorism – What are the risk? What can be done?, International product compliance magazine, 1997.
- IEEE C 37.90-1989. Relays and relays system associated with electric power apparatus.
- IEC 60947-4-1., Low-voltage switchgear and controlgear. , Part 4: Contactors and motor-starters. Section 1: electromechanical contactors and motor-starters.

- Information notice № 90-20: Common-Cause Failures Due to Inadequate Design Control and Dedication – Nuclear Regulatory Commission, March 17, 1996.
- The power protection handbook, APS, 1994.
- Сиромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей, М., Энергоатомиздат, 1984, 240 с.
- Федосеев А.М., Релейная защита электрических систем, М., Энергия, 1976, 560 с.
- Мусин А.М., Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты, М., Колос, 1979, 112 с.
- Цапенко Е.Ф., Контроль изоляций в сетях до 1000 в., М., Энергия, 1972.
- Sepam Merlin Gerin, Каталог 2003.
- Корогодский В.И. и др., Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кв, М., Энергоатомиздат, 1987.
- Тубис Я.Р., Температурная защита асинхронных двигателей, М., Энергия, 1977.
- Ментешев М.С., Безопасно използване на електрическата енергия и контрол на изолацията в рудничните мрежи за ниско напрежение, Дисертация за получ. на научната степен „доктор на техн.науки“, ВМГИ, С., Техника, 1984.
- Писарев А., Марков М., Сарафов В., Пускови апарати и защита на асинхронни електродвигатели, С., Техника, 1980.

*Препоръчана за публикуване от катедра
„Електрификация на минното производство“, МЕМФ*