

ВНЕДРЯВАНЕ НА ТОВАРНО УСТРОЙСТВО В ЛАБОРАТОРНА СРЕДА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА РЕЖИМИТЕ НА РАБОТА НА РЕЛЕЙНИ ЗАЩИТИ В ТЯГОВА ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАЩА СИСТЕМА

Тодор Лалев, Георги Павлов, Илко Търпов

tlalev@vtu.bg, gpavlov@vtu.bg, itarpov@vtu.bg

*Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”,
София 1574, ул. „Гео Милев” № 158
БЪЛГАРИЯ*

Резюме: Настоящият доклад представя етапите по внедряване на товарно устройство в лабораторната база на катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта“ към ВТУ „Тодор Каблешков“, с цел осигуряване на реалистични условия за експериментално изследване на релейни защиты, използвани в тягова електрозахранваща система (ТЕС) за променлив ток.

Изградена е учебно-изследователска среда, в която товарното устройство изпълнява ролята на управляем модел на натоварване, позволяващ симулация на различни експлоатационни и аварийни режими на работа на ТЕС. Чрез тази система се извършват измервания, изпитвания и анализи на поведението на цифрови релейни защиты при променливи условия на работа.

Основната цел е да се представи интегриран подход, включващ съвременна измервателна и защитна апаратура, реални защитни алгоритми и новоразработени лабораторни упражнения, приложими както в обучението на студенти, така и в научноизследователската дейност.

Създадената конфигурация осигурява практическа основа за анализ на ефективността, бърздействието, селективността и адаптивността на защитните системи в реални или симулирани ситуации, характерни за железопътния електрически транспорт.

Докладът акцентира върху значението на реалистичното лабораторно обучение, връзката му с изискванията на съвременната енергийна инфраструктура и необходимостта от адекватна инженерна подготовка за проектиране и поддръжка на релейни системи в ТЕС.

Ключови думи: товарно устройство, релейни защиты, тягова електрозахранваща система

1. УВОД

Последните години всички нови релейни защиты (РЗ), внедрявани в транспортните електроенергийни инфраструктури, са базирани на цифрови технологии. Тези системи са от съществено значение за надеждното функциониране на стратегически обекти като „Метрополитен“ ЕАД, „Столичен електротранспорт“ ЕАД и Национална компания „Железопътна инфраструктура“ (НКЖИ). Именно в тези дружества намират професионална реализация голяма част от завършилите ВТУ „Тодор Каблешков“ специалисти по електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта.

С цел да се отговори на нарастващите изисквания за подготовка на кадри с практически умения в областта на релейните защиты, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта“ предприе целенасочени стъпки за изграждане на учебно-изследователска база.

В доклада се акцентира върху два характерни вида релейни защиты, прилагани в тяговите подстанции 25 kV за железопътния транспорт в България:

- диференциална защита – предназначена за защита на тяговия трансформатор
- дистанционна защита – за защита на изводите към контактната мрежа.

В лабораторията на ВТУ „Тодор Каблешков“ са налични цифрови релейни защиты ADR213B (диференциална) и ADR219A (дистанционна). Макар тези устройства да не се

използват в българската железопътна инфраструктура, те са представителни за този тип защитни функции и се използват като учебни и изследователски стендове.

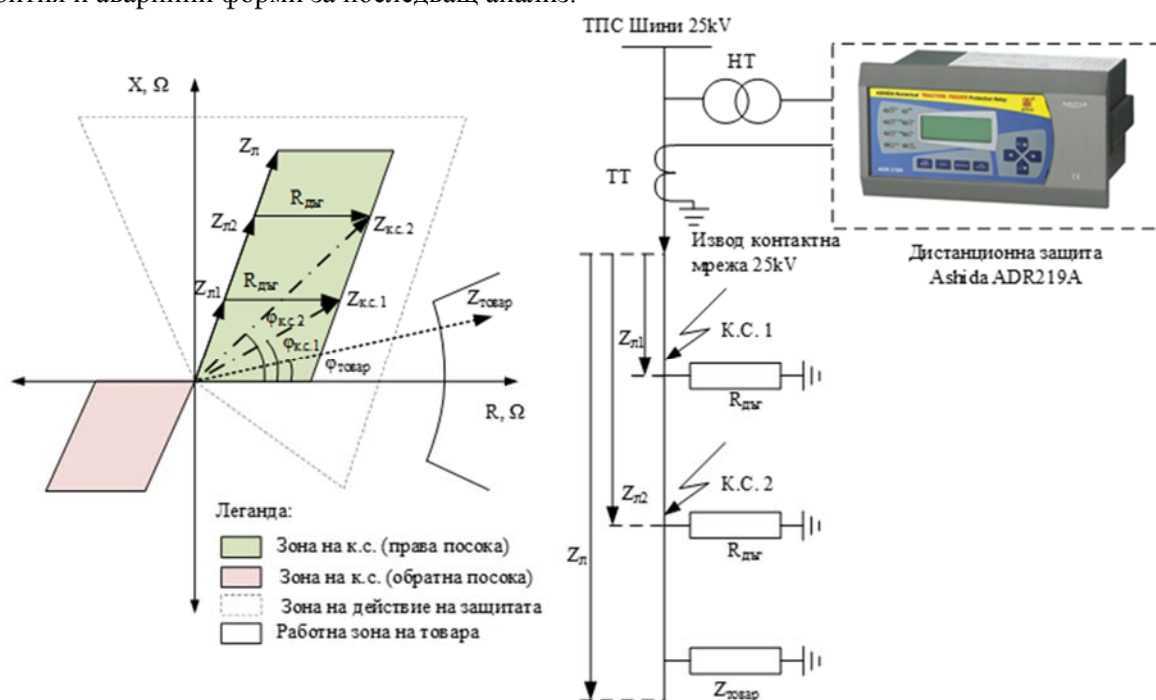
Докладът разглежда следващия етап от развитието на лабораторната среда – внедряването на товарно устройство, което да осигури реалистични условия за симулация на различни експлоатационни и аварийни режими в тягови електрозахранващи системи (ТЕС). С тази стъпка се цели надграждане на съществуващата инфраструктура и разширяване на възможностите за експериментално изследване на поведението на цифровите релейни защиты в условия, близки до реалните.

2. ТЕОРЕТИЧЕН ПРЕГЛЕД

РЗ е основен елемент за осигуряване на надеждността и сигурността на електроенергийните системи. С развитието на цифровите технологии все по-широко приложение намират микропроцесорните цифрови релейни защиты (ЦРЗ), които се отличават с висока прецизност, бързодействие и разширена функционалност спрямо класическите електромеханични и твърдотелни релета. В тази част се представят основните принципи на действие на ЦРЗ, внедрени в лабораторната среда на ВТУ „Тодор Каблешков“.

2.1. Дистанционна защита – Ashida ADR219A

ADR219A е ЦРЗ, проектирана за защита на захранващи фидери към контактната мрежа 25 kV. Устройството реализира множество защитни функции: дистанционна защита (ДисЗ), максимално токова отсечка (МТО), защита от грешно фазово свързване при паралелна работа на два захранващи фидера КМ, защита от рекуперирана електрическа енергия, автоматично повторно включване и защита при отказ на прекъсвача. Благодарение на цифровата обработка на сигнали от измервателните трансформатори (фиг.1 НТ и ТТ), ADR219A изчислява импеданси и други електрически параметри, осигурявайки висока точност и селективност на защитните действия. Освен това устройството поддържа интерфейс за SCADA и запис на събития и аварийни форми за последващ анализ.



Фиг. 1. Принцип на действие на дистанционната защита с реле ADR219A

На фиг. 1 е показана характеристиката на задействане на дистанционната защита. Тази диаграма се използва за анализ на поведението на ЦРЗ и за определяне на изискванията към товарното устройство за тестване на релейни защиты. В импедансната координатна равнина са очертани четири основни области: зона на късо съединение в права посока, зона на късо съединение в обратна посока, зона на действие на защитата и работна зона на товара.

Представени са измерените импеданси на товара $Z_{\text{товар}}$ и на късото съединение $Z_{\text{к.с.л1}}$ и $Z_{\text{к.с.л2}}$ в комплексната равнина $R+jX$. Съотношението между тези величини е показател за работата на защитата в системата за електрозахранване на контактна мрежа [1,6].

При нормална експлоатация измереният импеданс се определя от:

$$(1) \quad Z_{\text{товар}} = \frac{U_{\text{км}}^2}{P_{\text{товар}}}$$

където $U_{\text{км}}$ напрежение на КМ а $P_{\text{товар}}$ активна мощност на товара.

Фазовият ъгъл $\varphi_{\text{товар}}$ между тока и напрежението при това състояние е:

$$(2) \quad \varphi_{\text{товар}} = \arctan(Q/P)$$

След възникване на повреда измереният импеданс се „измества“ към импеданса на късо съединение в точките к.с.1 или к.с.2, който обикновено е по-малък от $Z_{\text{товар}}$. Неговата стойност съответства на импеданса на линията до мястото на к.с. $Z_{\text{к.с.л1}}$ или $Z_{\text{к.с.л2}}$ между точката на измерване и мястото на повредата. При наличие на дъгово или преходно съпротивление, към линейния импеданс се добавя активен компонент $R_{\text{дъг}}$:

$$(3) \quad Z_{\text{к.с.}} = Z_{\text{л}} + R_{\text{дъг}}, \text{ като фазовият ъгъл при к.с. е } \varphi_{\text{товар}}$$

Характеристиката на задействане на Дис3 е дефинирана чрез фиксирана граница в импедансната диаграма, която разделя зоната на повреда от зоната на нормално натоварване. Това позволява проверка на зададения радиус по оста r (толеранс към дъгово съпротивление) и на съответствието му с очакваните условия на работа. Посочената селективност се постига чрез измерване на фазовия ъгъл, което гарантира коректно определяне на посоката на установените импеданси.

2.2. Диференциална защита – Ashida ADR213B

ADR213B е ЦРЗ, специално проектирана за защита на тягови трансформатори в железопътната инфраструктура 25kV, 50Hz. Устройството използва високоскоростен цифров сигнален процесор, който анализира токовете от страната на високо напрежение (110 kV, $I_{\text{ВН}}$) и средно напрежение (25 kV, $I_{\text{СРН}}$), постъпващи от токовете трансформатори (ТТ). На тази основа се изчисляват реални стойности, хармонични съставки и други ключови параметри на електрическата мрежа.

За коректно сравнение на токовете от двете страни на трансформатора ($I_{\text{ВН}}$ и $I_{\text{СРН}}$), ADR213B позволява настройване на коефициент на трансформация $k_{\text{тр}}$, който отчита разликите в токовете $\text{ТТ}_{\text{ВН}}$ и $\text{ТТ}_{\text{СРН}}$.



Фиг. 2. Принципна схема на диференциална защита на тягов трансформатор с реле ADR213B

Фиг. 2 показва принципна схема на присъединяване на диференциалната защита (ДифЗ) към тягов трансформатор. В схемата Q0 обозначава прекъсвачите на първичната (110 kV) и вторичната (25 kV) страна, които се управляват от защитата и осигуряват двустранно изключване на защитавания обект при необходимост.

Измерването на токовете се извършва чрез токови трансформатори – ТТ_{ВН} на страната на високо напрежение (110 kV) и ТТ_{СРН} на страната на средно напрежение (25 kV). Показан е и товарният ток ($I_{\text{товарВН, СРН}}$), който в нормален режим протича от 110 kV към 25 kV. Диференциалната защита заработва, когато се установи значителна разлика между двата измерени тока ($I_{\text{ВН}}$ и $I_{\text{СРН}}$). Тази разлика се нарича диференциален ток ($I_{\text{диф}}$) и служи като критерий за наличието на вътрешна повреда в трансформатора.

$$(4) \quad I_{\text{диф}} = |I_{\text{ВН}} - I_{\text{СРН}}|$$

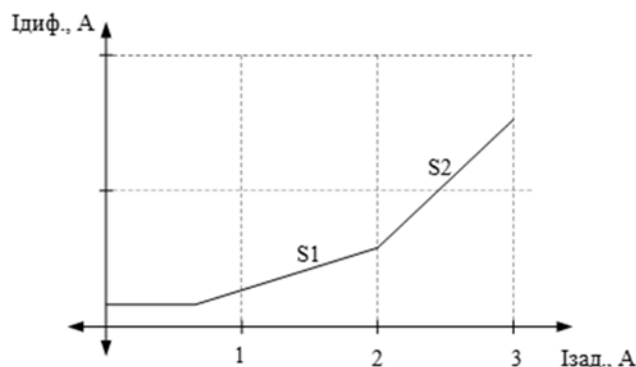
На теория - При липса на вътрешна повреда $I_{\text{диф}} \approx 0$, защото всички токове се преобразуват през ТТ-ри без загуби и коефициентите на трансформация са идеални.

На практика - Съществуват паразитни разлики в измерваните токове поради: грешки на ТТ; насищане на ТТ при големи токове при външна повреда ($I_{\text{вън.пов.}}$); намагнитващ ток при първоначално включване на трансформатора; превключване на янсеновия регулатор и др..

След корекцията устройството изчислява диференциален ток ($I_{\text{диф}}$), който се сравнява със задържащия ток ($I_{\text{зад}}$), според условията:

$$(5) \quad I_{\text{диф}} \geq S \cdot I_{\text{зад}}, \text{ където } I_{\text{зад}} = \frac{I_{\text{ВН}} + k_{\text{тр}} \cdot I_{\text{СРН}}}{2}$$

За да избегне фалшиви заработвания, релето ADR213В използва двойна наклонена характеристика (фиг.3) и блокиране при наличие на >15% 2-ра хармонична в $I_{\text{вън.пов.}}$ [1,4,5]



Фиг. 3. Адаптирана характеристика за ADR213В диференциален и задържащ ток.

Фиг. 3 показва връзката между диференциален ток $I_{\text{диф}}$ и задържащия ток при външна повреда $I_{\text{зад}}$ за релето ADR213В.

S1 (10–50%) – Висока чувствителност при ниски стойности на задържащия ток $I_{\text{зад}}$, позволява надеждно откриване на вътрешни повреди в трансформатора.

S2 ($\approx 80\%$) – Повишена устойчивост срещу фалшиви заработвания при големи стойности на $I_{\text{зад}}$, причинени от насищане на ТТ, външни къси съединения и други смущения [2,5].

3. ИЗБОР НА ТОВАРНОТО УСТРОЙСТВО ЗА ТЕСТВАНЕ НА РЕЛЕЙНИ ЗАЩИТИ

Преди да се направи избор на подходящо товарно устройство, е необходимо ясно да се дефинират задачите, които ще се изпълняват с него. С развитието на ЦРЗ и нарастващата им сложност, нараства и необходимостта от комплексни тестове, които да осигурят надеждната им работа в различни експлоатационни режими.

В практиката тези тестове се разделят на три основни групи:

Приемателни изпитвания – извършват се непосредствено след доставката на защитата с цел потвърждаване на нейната цялостност, правилен модел и коректна работа на основните функции;

Наладъчни (пускови) изпитвания – прилагат се при първоначално въвеждане в експлоатация за проверка на настройките, схемите на свързване и логическите зависимости, за да се гарантира надеждното действие на защитата;

Периодични изпитвания за поддръжка – провеждат се регулярно по време на експлоатация за потвърждаване на дългосрочната стабилност на защитата и за откриване на евентуални отклонения в параметрите.

В т.2 от доклада бяха представени ЦРЗ, с които разполага лабораторията към ВТУ „Тодор Каблешков“. Те са съвременни устройства с бързи микропроцесори, предназначени основно за железопътната инфраструктура. Основна особеност е, че те са еднофазни. С цел развитие на лабораторията и разширяване на възможностите за изследвания и обучение, е планирано внедряване на стендове за трифазни системи използвани в енергетиката.

В тази връзка, при избора на товарно устройство, освен цената като основен фактор, се поставя акцент и върху неговата приложимост за бъдещите задачи. Избраното решение трябва да е подходящо за пълноценно използване в изпитвания на РЗ за различни типове електрозахранващи системи. Затова то е определено на база следните основни показатели: брой фази, диапазони на регулиране на ток и напрежение, честотен обхват, точност на измерванията, брой и тип на цифровите входове и изходи, както и възможности за автоматизация на тестовете.

Предложеното товарно устройство с гореописаните характеристики и методи за изпитване осигурява необходимата гъвкавост и точност за анализ на ЦРЗ.

3.1. Товарно устройство

След извършен сравнителен анализ между различни производители и модели, за нуждите на лабораторията беше избрано товарно устройство от Huazheng Electric тип HZJB-I. [2,3] Основен аргумент за избора е съществената ценова разлика спрямо утвърдени западни марки – устройството е няколко пъти по-евтино, без това да компрометира основните функционалности, необходими за целите на тестването.

HZJB-I представлява многофункционален трифазен тестер, предназначен за изпитване на ЦРЗ, като позволява симулиране на широк набор от аварийни и нормални режими чрез независим контрол на токовете и напрежените канали.

Основни технически характеристики:

- Трифазна конфигурация с три независими токове и три напрежени изхода;
- Токови изходи до 3×40 A (или до 120 A в паралелен режим);
- Напрежени изходи до 3×120 V фазно / 240 V линейно (AC), както и ± 160 V DC;
- Честотен обхват от 20 Hz до 1000 Hz, с възможност за симулация на хармонични изкривявания;
- 10 цифрови входа (поддържащи както сух контакт, така и 0–250 V) и 8 цифрови програмируеми изхода;
- Точност на измерванията: $\pm 0.2\%$ за напрежение и ток, времева точност < 0.1 ms;
- Интерфейс и софтуер за автоматизирано провеждане на тестове, включително комбинации от pickup, timing и logic проверки.[3]

Функционалности на софтуера:

- Изолирана работа с възможност за AC/DC тестове, хармонично наслагване, синхронизационни тестове, тестове по мощност и импеданс.
- Автоматични, полуавтоматични и ръчни режими на изпитване, осигуряващи гъвкавост при работа с различни защитни устройства.
- Анализ на времето за сработване и възстановяване на релета, както и комплексни тестове за диференциална защита и дистанционна защита на линии (6–35 kV).
- Възможност за преглед и архивиране на аварийни събития, улесняваща последващия анализ и диагностика.

HZJB-I предлага необходимата функционалност за изпитване на широк кръг цифрови релейни защиты, както в железопътната инфраструктура, така и в класически енергийни приложения. Подходящо е както за еднофазни, така и за трифазни стендове, което го прави ефективно и икономически обосновано решение за развитие на лабораторна база.[3]

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Съвременните ЦРЗ се отличават с висока сложност и многообразие от функции, което изисква модерни подходи за тяхното изследване, настройка и поддръжка. За да отговори на тези предизвикателства и да осигури качествена подготовка на бъдещи инженери, лабораторията към ВТУ „Тодор Каблешков“ има нужда от ново многофункционално товарно устройство.

Избраната система от тип HZJB-I предлага всички необходими възможности за изпитване на релейни защиты – от еднофазни до трифазни, както в железопътната инфраструктура, така и в енергетиката. Благодарение на вградения индустриален компютър, прецизните аналогово-цифрови преобразуватели и софтуерната платформа с автоматизирани и ръчни режими на тестване, устройството позволява провеждането на комплексни тестове при различни аварийни сценарии.

Внедряването на такова оборудване ще осигури:

- провеждане на реалистични лабораторни упражнения с ЦРЗ;
- изграждане на нови трифазни тестови стендове;
- развитие на научноизследователска дейност и проекти, насочени към модернизация на електрозахранващите системи.

По този начин лабораторията ще се превърне в център за обучение и иновации, който подготвя специалисти, готови да отговорят на съвременните изисквания за надеждност и сигурност в релейната защита.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Ashida Electronics Pvt. Ltd., Numerical Integrated Digital Traction Feeder Protection Relay ADR213Bm – Commissioning, Operation and Maintenance Manual, 2010.
- [2] Elmore, W. A. (Ed.), Protective Relaying: Theory and Applications, Second Edition, CRC Press, 2003.
- [3] HZJB-I, 3 Phase Relay Protection Tester – User Manual, Huazheng Electric, 2025.
- [4] IEC 60050-448:2009, International Electrotechnical Vocabulary – Part 448: Power System Protection, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2009.
- [5] Ziegler, G., Numerical Differential Protection: Principles and Applications, Second Edition, Siemens, 2012.
- [6] Ziegler, G., Numerical Distance Protection: Principles and Applications, Third Edition, Siemens, 2011.

IMPLEMENTATION OF A LOADING DEVICE IN A LABORATORY ENVIRONMENT FOR RESEARCH AND ANALYSIS OF THE OPERATING MODES OF RELAY PROTECTIONS IN A TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM

Todor Lalev, Georgi Pavlov, Ilko Tarpov
tlalev@vtu.bg, gpavlov@vtu.bg, itarpov@vtu.bg

*Todor Kableshev University of Transport,
Sofia, Geo Milev Str. 158,
BULGARIA*

***Abstract:** This report presents the stages of implementing a loading device in the laboratory base of the Department of "Power Supply and Electrical Equipment of Transport" at the "Todor Kableshev" Higher Transport School, in order to provide realistic conditions for experimental research of relay protections used in an alternating current traction power supply system (TSS).*

A teaching and research environment has been built in which the load device acts as a controllable load model, allowing simulation of various operational and emergency operating modes of TPPs. This system is used to perform measurements, tests and analyses of the behavior of digital relay protections under variable operating conditions.

The main goal is to present an integrated approach, including modern measuring and protection equipment, real protection algorithms and newly developed laboratory exercises, applicable both in student training and in research activities.

The created configuration provides a practical basis for analyzing the efficiency, speed, selectivity and adaptability of protection systems in real or simulated situations typical of railway electric transport.

The report emphasizes the importance of realistic laboratory training, its connection with the requirements of modern energy infrastructure and the need for adequate engineering training for the design and maintenance of relay systems in TPPs.

Key words: *load device, relay protection, traction power supply system*