Сиченко В.Г., Кузнецов В.Г., Босий Д.А.

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ НАПРУГИ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ЗМІННОГО СТРУМУ ПРИ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

В статті представлено результати експериментального дослідження режиму напруги в тяговій мережі змінного струму при рекуперативному гальмуванні електровозу з асинхронним приводом: виконано статистичну обробку отриманих результатів та показани шляхи поліпшення показників якості електроенергії.

Вступ

На режимі напруги в тяговій мережі змінного струму впливає низка чинників. Перш за все, це режими роботи системи зовнішнього електропостачання, кількість електрорухового складу на фідерній зоні системи тягового електропостачання та режим ведення кожного електровозу. В свою чергу, кожен з вказаних чинників залежить від певних параметрів. Так, наприклад, режим ведення електровозу залежить від кваліфікації та досвідченості машиніста, профілю ділянки, ваги поїзда, його складу та типу електровозу. З точки зору енергозбереження, важливою є можливість електровозу повертати кінчену енергію рухового складу в первинну мережу. При застосуванні рекуперативного гальмування важливою задачею є визначення впливу рекуперувального електровозу на показники якості електроенергії в точках приєднання тягових підстанцій до ліній зовнішнього електропостачання.

Проведення експерименту

Для визначення впливу були проведені експериментальні дослідження на дільниці Баришівка – Яготин Південно-Західної залізниці, де експлуатуються електровози змінного струму з можливістю рекуперації електричної енергії. Для дослідження було обрано електровоз вітчизняного виробництва ДС3 з асинхронним приводом. На стадії підготовки експерименту у вторинній колі електровозу присудено портативний аналізатор якості електричної енергії EDL175 виробництва SATEC (рис. 1). Живлення приладу забезпечено блоком безперебійного живлення (UPS), безперервний запис параметрів – портативним комп’ютером.

На тягових підстанціях Баришівка встановлювалися аналізатори якості електроенергії PNA296 – у вторинній колі трансформатору напруги (ТН) 110 кВ та Парма – у вторинні колі ТН 35 кВ. Під час експерименту дослідна ділянка Баришівка – Яготин була захищена консолідуючо (рис. 2).

Дослідні дані сформовано з електровозі ДС3 та двох двосекційних тепловозів. Для уникнення впливу іншого електрорухового складу на режим рекуперації розроблено нічне “вікно” 1:30 – 3:30, котрим заборонено пропуск поїздів під електротягого на цій дільниці в парному та непарному напрямках.

При випаді виходу на нейтральну вставку 46 км на перегонах між станціями Бориспіль, Баришівка, Березань, Переяславська та Яготин електровоз ДС3 застосовував рекуперативне гальмування з такими гальмувальними зусиллями: 25 %, 50 %, 75 % та 90 %.

Вимірювальні прилади, встановлені на тяговій підстанції Баришівка (110 кВ і 115 кВ силового трансформатору) та в електровозі ДС3 з синхронізацією за часі фіксували показники якості електричної енергії.

1 ДНУ залізничного транспорту ім. акад. В. Лазарюна, канд. техн. наук, доц.
2 ДНУ залізничного транспорту ім. акад. В. Лазарюна, канд. техн. наук, доц.
3 ДНУ залізничного транспорту ім. акад. В. Лазарюна, аспірант
Рис. 1 – Схема подключения приладу EDL175 у вторинні кола електровозу ДС3

Рис. 2 – Схема подключения приладів на тяговій підстанції “Баришівка”
Результати експерименту

Після обробки зафіксованих даних отримано наступні залежності.
На рис. 3 показано рівень напруги на струмоприймачеві електровозу під час дослідної поїздки. Максимальний зафіксований розмах зміни напруги становить 1,33 %. Короткочасна доза флікера в деякі відрізки часу перевищувала гранично допустиме значення, складаючи при цьому 8,92 від. од. Перевищення норми по довготривалій дозі флікера не зафіксовано.

На рис. 4 приведені значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги в контактній мережі. Стрілками з позначенням зусилля показано відрізки часу, коли застосовувалося рекуперативне гальмування. У режимі вибігу («вхід») електровозу значення \( k_U \) складало 2-2,5 %; при рекуперації спостерігалося збільшення \( k_U \) на величину 0,5-1,1 %.

Залежність коефіцієнта спотворення кривої струму електровозу показано на рис. 5. Миттєві стрибки значень відповідають моментам зміни режиму ведення електровозу. Значне спотворення кривої струму спостерігалось при малих зусиллях рекуперації (до 50 %) та при споживанні електроенергії на власні потреби електровозу.

При збільшенні зусилля рекуперації крива струму стає більш подібною до синусоїди (рис. 6).

Рис. 3 – Рівень напруги на струмоприймачеві електровозу: 1 – рух в непарному напрямку; 2 – зупинка; 3 – рух в парному напрямку

Рис. 4 – Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги в тяговій мережі

Рис. 5 – Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму електровозу

Рис. 6 – Криві струму електровозу при різних значеннях гальмівного зусилля: \( a-25\ %; \ b-50\ %; \ c-75\ %; \ d-90\ % \)
Нами було прийнято гіпотезу про нормальний закон розподілу отриманих в результаті дослідження величин. Виконаними статистичними розрахунками підтверджується, що закони розподілу величин напруги в первинній мережі та коєфіцієнтів спотворення сінусоїдальності підпорядковуються нормальному закону.

На рис. 7 показано отримані закони розподілу діючих значень напруги, які показують наявність несиметрії напруги в первинній мережі.

В свою чергу, жодне із зафіксованих значень коєфіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності не перевищує встановленої норми (рис. 8). При підготовці схеми живлення спостерігалось зниження розширення значення показника відносно математичного очікування. Останнє зменшувалось на незначну величину.

На рис. 9 показано динаміку зміни коєфіцієнтів спотворення сінусоїдальності кривих напруги 110 кВ до експерименту та під час проведення. До експерименту (рис. 9, а) абсолютні значення $k_u$ кожної фази різні, але тенденція зміни однакова. При зібранні для експерименту схеми живлення значення $k_u$ фаз «В» і «С» практично зблизились (рис. 9, б).

Рис. 7 – Закони розподілу діючих значень напруги 110 кВ ЕЧЕ Баришівка

Рис. 8 – Значення коєфіцієнту несиметрії напруги 110 кВ ЕЧЕ Баришівка

Рис. 9 – Коефіцієнти спотворення сінусоїдальності напруги 110 кВ ЕЧЕ-“Баришівка”:
а – до експерименту; б – під час експерименту

На рис. 10 наведено отримані залежності середніх значень характерних гармонійних складових струмів рекуперації електровозу від гальмівного зусилля. Значення гармонік струму, починаючи з 5-ї складової, на порядок нижчі від значення 3-ї. Амплітудне значення 3-ї гармонійної складової струму при рекуперації досягало значення 7,75 А.
Рис. 10 – Залежності вищих гармонік струму електровозу при рекуперації від гальмівного зусилля

Висновки

1. Рівень напруги на струмоприймачеві перевищує номінальне значення 27,5 кВ, присутні коливання, незалежні від режиму роботи електровозу. Математичне очікування напруги на струмоприймачеві $M(U) = 28,296$ кВ.

2. Рівень напруги на шинах 110 кВ не відповідає номінальному значенню і має несиметричний характер: математичне очікування $M(U_A) = 112,138$ кВ, $M(U_B) = 113,5$ кВ, $M(U_C) = 111,628$ кВ. Коливання напруги на шинах 110 кВ не пов’язані зі зміною режимів роботи електровоза, при цьому коефіцієнти несиметрії не перевищували нормованих значень.

3. Коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги при нормалійній схемі електропостачання перевищує нормально допустиме значення.

4. Під час рекуперації при малих рівнях гальмівного зусилля (до 50 %) виникає широкий спектр гармонік струму, амплітуда 3-ї гармонійної складової сягає значення 7,75 А, що може негативно впливати на роботу пристроїв залізничної автоматики та автоматичної локомотивної сигналізації.

5. Встановлено наявність превалюючого значення 3-ї гармонійної складової струму, яка збільшується зі збільшенням рівня рекуперації.

6. На тяговій підстанції необхідно застосовувати пристрої симетрування або поліпшення якості електричної енергії. Для вибору варіанту та схеми необхідно розширити базу експерименту для отримання статистичних оцінок необхідних величин.

7. На електровозі ДС3 доцільно встановити фільтр-компенсатор 3-ї гармонійної складової струму.

Перелік посилань


Рецензент: Б.Т. Власенко, канд. техн. наук, доц., ДНУ залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна

стаття надійшла 15.03.2008