

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет міського
господарства імені О. М. Бекетова

На правах рукопису

ТУГАЙ ДМИТРО ВАСИЛЬОВИЧ



УДК 621.314

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ
ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

*Удостоверення
до з'ясування
з іменами учасників
команди до фізики
Дисертація
Меркульєв Степан
спеціалізований
вчений рада
Ф.В.С.Р.В.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук



Науковий консультант
Жемеров Георгій Георгійович
доктор технічних наук, професор

Харків – 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН В ФОРМУВАННІ КОНЦЕПЦІЇ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ SMART GRID.....	22
1.1 Концепція розвитку енергетики Smart Grid. Основні вимоги.....	22
1.2 Зменшення втрат енергії в системі електропостачання при реалізації Smart Grid.....	26
1.2.1 Компенсація реактивної потужності і пульсацій миттєвої активної потужності.....	26
1.2.2 Використання енергоємних накопичувачів енергії.....	29
1.2.3 Модернізація системи електропостачання комунальних споживачів енергії.....	31
1.3 Нормативна база для впровадження Smart Grid.....	36
1.4 Напівпровідникові перетворювачі енергії для Smart Grid.....	43
1.4.1 Ієрархічні рівні організації Smart Grid.....	43
1.4.2 Перетворювачі для FACTS.....	45
1.4.3 Перетворювачі для HVDC і MVDC.....	58
1.4.4 Перетворювачі для систем розподіленої генерації і підключення накопичувачів енергії.....	60
1.5 Накопичувачі енергії для Smart Grid.....	71
1.5.1 Механічні накопичувачі енергії.....	74
1.5.2 Електрохімічні накопичувачі енергії.....	76
1.5.3 Електричні накопичувачі енергії.....	79
1.5.4 Хімічні накопичувачі енергії.....	80
Висновки за розділом 1.....	81
РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ SMART GRID.....	83

2.1 Вибір індуктивності фазних реакторів паралельного силового активного фільтра за врахування низькочастотної і високочастотної складових електромагнітних процесів.....	84
2.1.1 Особливості роботи САФ.....	86
2.1.2 Врахування низькочастотної складової електромагнітних процесів при виборі індуктивності фазних реакторів.....	89
2.1.3 Врахування високочастотної складової електромагнітних процесів при виборі індуктивності фазних реакторів.....	95
2.1.4 Методика вибору індуктивності САФ.....	98
2.2 Вибір індуктивності фазних реакторів активного випрямляча – джерела напруги при врахуванні процесів «закачування» енергії.....	99
2.2.1 Процеси «закачування» енергії в АВДН.....	100
2.2.2 Врахування низькочастотних електромагнітних процесів.....	105
2.2.3 Врахування високочастотних електромагнітних процесів.....	108
2.2.4 Методика вибору індуктивності фазних реакторів АВДН.....	110
2.2.5 Вплив типу системи управління та індуктивності фазних реакторів на характеристики АВДН.....	111
2.3 Співставлення перетворювальних систем високовольтного частотно-регульованого електропривода змінного струму.....	112
2.3.1 Перетворювач частоти на основі АІС-ВД.....	115
2.3.2 Перетворювач частоти на основі каскадного багаторівневого інвертора напруги.....	122
2.3.3 Порівняння результатів моделювання перетворювальних систем з ПЧ.....	129
2.4 Чотиритактний підвищуючий широтно-імпульсний перетворювач постійної напруги у постійну в системі електропостачання з сонячними батареями.....	133
2.4.1 Схеми автономних і мережевих сонячних електростанцій.....	133
2.4.2 Робота ППНП з сонячними батареями.....	136

2.4.3 Математична модель сонячного елемента.....	138
Висновки за розділом 2.....	142
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ЕФЕКТУ В ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	144
3.1 Перетворення систем координат в силовій електроніці і електроприводі.....	145
3.2 Теорема про мінімум втрат енергії в трифазних системах електропостачання.....	151
3.2.1 Еквівалентна схема трифазної чотирипровідної системи електропостачання з силовим активним фільтром.....	153
3.2.2 Причини виникнення додаткових втрат енергії в СЕ.....	155
3.2.3 Максимально можливий ККД трифазної СЕ.....	157
3.2.4 Формулювання теореми про мінімум втрат енергії в трифазних СЕ.....	161
3.3 Енергозберігаючий ефект компенсації пульсацій миттєвої активної потужності.....	163
3.3.1 Одна пульсація активної потужності.....	165
3.3.2 Накладення двох пульсацій активної потужності.....	168
3.3.3 Накладення трьох пульсацій активної потужності.....	170
3.4 Енергоефективність корекції фази струму з одночасною компенсацією пульсацій активної та реактивної потужностей в трифазних системах електропостачання.....	174
Висновки за розділом 3.....	182
РОЗДІЛ 4. РОЗВИТОК СУЧАСНОЇ ТЕОРІЇ МИТТЄВИХ АКТИВНОЇ І РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТЕЙ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ СУМАРНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВТРАТ І ЇЇ СКЛАДОВИХ В ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	184
4.1 Енергія і потужність в системах розподіленого електропостачання..	185
4.1.1 Основні характеристики систем електропостачання.....	186

4.1.2	Потужність резистивного короткого замикання.....	190
4.1.3	Розрахунок ККД СЕ.....	192
4.1.4	Максимальний і реальний ККД.....	196
4.1.5	Обмін енергією, миттєва активна і реактивна потужності.....	198
4.2	Фізичний зміст поняття «реактивна потужність» стосовно трифазних систем електропостачання з нелінійним навантаженням.....	201
4.2.1	Відповіді на попередні питання, що дозволяють сформулювати визначення терміну «реактивна потужність».....	203
4.2.2	Обґрунтування прийнятих припущень для визначення фізичного змісту поняття «реактивна потужність».....	206
4.2.3	Визначення реактивної потужності.....	209
4.3	Складові сумарної потужності втрат в трифазних системах електропостачання.....	210
4.3.1	Потужність втрат і реактивна потужність в трифазних системах електропостачання при симетричних синусоїдальних напругах джерела.....	210
4.3.2	Залежність додаткових втрат в трифазних системах електропостачання від пульсацій миттєвої активної потужності.....	218
4.3.3	Складові сумарною потужності втрат в трифазній чотирипровідній системі електропостачання при симетричних синусоїдальних напругах джерела.....	219
4.3.4	Уточнення співвідношення для визначення сумарної потужності втрат в трифазній системі електропостачання.....	221
4.4	Складові сумарної потужності втрат в просторових pq координатах.....	228
4.4.1	Складові сумарної потужності втрат в просторових pq координатах за симетричних синусоїдальних напруг джерела.....	228
4.4.2	Складові сумарної потужності втрат в просторових pq координатах за несиметричних напруг джерела.....	234

4.4.3	Поширення результатів на існуючі методи розрахунку складових потужності втрат.....	237
	Висновки за розділом 4.....	239
РОЗДІЛ 5. ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ		
З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ І ЕНЕРГОЄМНИМИ НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....		
	243	243
5.1	Порівняння систем електропостачання рухомого складу метрополітену за їх енергоефективністю.....	244
5.1.1	Миттєва потужність мережі в інтервалі руху рухомого складу.	245
5.1.2	Розрахунок показників ефективності систем електропостачання.....	249
5.2	Енергозберігаючий ефект в Smart Grid системах електропостачання з магістральною схемою підключення споживачів.....	256
	Висновки за розділом 5.....	262
РОЗДІЛ 6. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ОТРИМАНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ.....		
	264	264
6.1	Комп'ютерна модель паралельного силового активного фільтра...	265
6.2	Комп'ютерне моделювання активного випрямляча – джерела напруги для перевірки методики вибору індуктивності фазних реакторів...	267
6.3	Моделювання електропривода змінного струму з каскадним багаторівневим інвертором напруги.....	270
6.3.1	Схема силових кіл і параметри елементів БРІПЧ.....	271
6.3.2	Matlab-модель БРІПЧ.....	274
6.3.3	Демонстрація роботи Matlab-моделі БРІПЧ.....	280
6.4	Моделювання систем електропостачання рухомого складу метрополітену.....	282
6.5	Комп'ютерне моделювання чотиритактного підвищуючого перетворювача постійної напруги в постійну в перетворювальній системі з сонячними батареями.....	288

6.6 Комп'ютерна модель для перевірки енергозберігаючого ефекту від компенсації пульсацій активної та реактивної потужностей і корекції фази струму.....	294
6.7 Математична модель трифазної системи електропостачання з силовим активним фільтром для оцінки складових сумарної потужності втрат.....	301
6.7.1 Структура моделі трифазної СЕ.....	302
6.7.2 Виконання умови $P_{usf} = \text{const}$ при моделюванні трифазної системи електропостачання.....	306
6.7.3 Matlab-модель трифазної СЕ.....	315
6.8 Перевірка розрахунку складових сумарної потужності втрат.....	320
6.8.1 Моделювання симетричних трифазних СЕ.....	320
6.8.2 Перевірка розрахункового співвідношення, що обумовлює залежність додаткових втрат від реактивної потужності і пульсацій миттєвої активної потужності.....	323
6.8.3 Перевірка наближеного співвідношення для розрахунку сумарної потужності втрат, як суми чотирьох складових.....	325
6.8.4 Перевірка уточненого співвідношення для розрахунку сумарної потужності втрат, як суми п'яти складових.....	331
6.8.5 Резерв підвищення ККД трифазної СЕ при підключенні САФ. Розрахунок складових потужності втрат у двох системах.....	332
6.9 Верифікація розрахунку елементів і якісних показників роботи системи електропостачання з паралельним силовим активним фільтром.....	335
Висновки за розділом 6.....	344
ВИСНОВКИ.....	347
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	353
ДОДАТОК А Перетворення просторових координатних систем.....	383
ДОДАТОК Б Розрахунок сумарної потужності втрат.....	389
ДОДАТОК В Акти впровадження.....	404