

Лю Чжэнья

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ
УЛЬТРАВЫСОКОГО
НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО
И ПОСТОЯННОГО ТОКА

перевод с китайского
под общей редакцией Ю.В. Шарова

УДК 621.311
ББК 31.279.1

Л 93

Лю Чжэнья

Л 93 Электрические сети ультравысокого напряжения переменного и постоянного тока / Лю Чжэнья ; Пер. с китайского А.В. Островского под общей редакцией Ю.В. Шарова. — М.: Издательство МЭИ, 2015. — 634 с.: ил.

ISBN 978-5-7046-1557-6

Китайская Народная Республика, как и Россия, обладает обширными территориями, сырьевые ресурсы и центры их потребления разнесены на огромные расстояния, что обуславливает интенсивное развитие технологий передачи электроэнергии по линиям ультравысокого напряжения.

В книге, впервые изданной на русском языке, рассмотрены все основные аспекты технологии передачи электроэнергии на переменном и постоянном токе ультравысокого напряжения в Китае — стране, которая сегодня в данной области занимает лидирующие позиции.

Книга адресована научным сотрудникам, аспирантам и студентам, обучающимся по направлению «Электроэнергетика и электротехника», а также китаеведам и просто любознательным читателям.

УДК 621.311
ББК 31.279.1

ISBN 978-5-7046-1557-6 (Издательство МЭИ)
ISBN 978-7-5123-4552-2 (China Electric Power Press)

© China Electric Power Press, 2013
© Издание на русском языке. Шаров Ю.В., 2015
© Издание на русском языке. Издательство МЭИ, 2015
© Оформление. Геча В.В., 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию	19
Введение	21
Глава 1. Развитие электрических сетей и увеличение напряжения электропередачи	
1.1. Развитие электрических сетей и объединение энергосистем	27
1.1.1. Электрическая сеть — ключевое звено электроэнергетической системы	27
1.1.2. История развития электрических сетей	30
1.1.3. Современное состояние объединенных энергосистем	33
1.1.4. Тенденции развития электроэнергетических систем	35
1.2. Предпосылки развития электропередачи ультравысокого напряжения, история ее исследований и разработок	41
1.2.1. Предпосылки развития электропередачи УВН	41
1.2.2. История разработки электропередачи УВН в мире	46
1.2.3. Инновации и практика передачи электроэнергии УВН в Китае	49
1.3. Смешанные электрические сети постоянного и переменного тока УВН	54
1.3.1. Особенности технологий передачи переменного и постоянного тока	54
1.3.2. Особенности смешанных энергосистем постоянного и переменного тока УВН	55
1.3.3. Принципы выбора класса УВН	56
Глава 2. Характеристики системы передачи переменного тока УВН	
2.1. Параметры ЛЭП УВН переменного тока	62
2.1.1. Удельные параметры ЛЭП	62
2.1.2. Влияние структуры расщепления провода на индуктивное и емкостное сопротивления линии	68
2.1.3. Сравнение параметров ЛЭП переменного тока сверх- и УВН	68
2.1.4. Схема замещения ЛЭП переменного тока УВН	68
2.1.4.1. Уравнения напряжения и тока П-образной схемы замещения	69
2.1.4.2. Расчет схемы замещения с распределенными параметрами	69
2.1.4.3. Волновое сопротивление и коэффициент передачи ЛЭП переменного тока УВН	72
2.1.4.4. Методы расчета параметров П-образной схемы замещения	72
2.2. Характеристики ЛЭП переменного тока УВН	73
2.2.1. Натуральная мощность	73
2.2.2. Передаваемая активная и реактивная мощности	75
2.2.3. Потери мощности и падение напряжения	77
2.2.3.1. Потери мощности в ЛЭП	77
2.2.3.2. Сравнение потерь мощности в ЛЭП сверх- и УВН	77
2.2.3.3. Падение напряжения в ЛЭП	79
2.2.4. Характеристики мощности и напряжения	80
2.2.4.1. Распределение напряжения и тока по ЛЭП в режиме одностороннего включения	80
2.2.4.2. Распределение напряжения и тока ЛЭП в нагрузочных режимах и в режиме холостого хода	81
2.2.4.3. Изменение напряжения в конце линии при изменении нагрузки	82

2.3. Устойчивость системы переменного тока УВН и методы расчета пропускной способности	83
2.3.1. Фундаментальное понятие устойчивости энергосистемы	83
2.3.1.1. Устойчивость по углу	84
2.3.1.2. Устойчивость по напряжению	89
2.3.1.3. Устойчивость по частоте	94
2.3.2. Требования к надежности и устойчивости энергосистемы и критерии определения устойчивости	96
2.3.2.1. Требования к надежности и устойчивости энергосистемы при больших возмущениях	96
2.3.2.2. Основные критерии определения всех видов устойчивости энергосистемы	97
2.3.3. Методы расчета пропускной способности системы переменного тока УВН	98
2.3.3.1. Методы расчета статической устойчивости по углу	98
2.3.3.2. Расчет динамической устойчивости по углу	98
2.3.3.3. Методы расчета устойчивости по углу при малых и больших возмущениях	99
2.3.3.4. Методы расчета устойчивости по напряжению	100
2.3.3.5. Расчет устойчивости по частоте	100
2.3.3.6. Расчет длительного переходного процесса	101
2.4. Влияние параметров сети на пропускную способность системы переменного тока УВН	101
2.4.1. Отношение реактивного сопротивления трансформатора к реактивному сопротивлению ЛЭП УВН	101
2.4.2. Отношение реактивного сопротивления генератора к реактивному сопротивлению ЛЭП УВН	103
2.4.3. Влияние способа включения генератора на пропускную способность ЛЭП УВН	104
2.4.4. Влияние параметров системы на пропускную способность передачи ультравысокого напряжения	106
2.4.4.1. Эквивалентная двухмашинная система УВН	107
2.4.4.2. Критерии определения и метод расчета пропускной способности передачи ультравысокого напряжения	108
2.4.4.3. Влияние мощности короткого замыкания передающей и принимающей систем на пропускную способность передачи УВН	108
2.4.4.4. Влияние поперечной компенсации на пропускную способность ЛЭП УВН	109
2.4.4.5. Влияние продольной компенсации на пропускную способность ЛЭП УВН	110
Глава 3. Особенности систем передачи постоянного тока ультравысокого напряжения	
3.1. Основные принципы передачи постоянного тока высокого напряжения	112
3.1.1. Технические основы преобразования и передачи постоянного тока высокого напряжения	112
3.1.2. 6-пульсные преобразователи	113
3.1.3. 12-пульсные преобразователи	117
3.2. Особенности систем передачи постоянного тока УВН	119
3.2.1. Структура систем передачи постоянного тока УВН	119
3.2.2. Режимы работы систем передачи постоянного тока	124
3.2.2.1. Режимы работы схем соединения систем передачи постоянного тока	124

3.2.2.2. Изменение направления передачи мощности	126
3.2.2.3. Режимы работы при полном и пониженном напряжении	127
3.2.2.4. Модель регулирования активной мощности постоянного тока	127
3.2.2.5. Симметричные и несимметричные режимы работы биполярной передачи	128
3.2.2.6. Модели управления реактивной мощностью на преобразовательных подстанциях	129
3.2.3. Особенности линий передачи постоянного тока УВН и их применение	130
3.2.3.1. Преимущества линий передачи постоянного тока и их практическое применение	130
3.2.3.2. Ограничения технологий передачи постоянного тока и тенденции развития	132
3.3. Безопасная и стабильная эксплуатация систем передачи постоянного тока УВН	134
3.3.1. Стабилизирующая роль систем переменного тока для систем постоянного тока	134
3.3.2. Методы включения систем постоянного тока	135
УВН в системе переменного тока	
3.3.3. Методы оценки устойчивости систем переменного тока при соединении с системами постоянного тока ультравысокого напряжения	136
3.4. Взаимное влияние систем постоянного тока УВН и систем переменного тока	140
Глава 4. Создание электрических сетей ультравысокого напряжения	
4.1. Прогноз потребления электроэнергии в Китае	142
4.1.1. Тенденции развития национальной экономики	142
4.1.2. Уровень спроса на электроэнергию и распределение центров нагрузки	144
4.1.3. Структура и размещение генерации	146
4.1.4. Структура потоков электроэнергии	150
4.2. Выбор способа передачи электроэнергии с крупных баз энергоресурсов	153
4.2.1. Обзор крупных областей размещения источников энергии	153
4.2.2. Способы передачи электроэнергии с крупных энергетических баз	155
4.2.3. Связи между энергосистемами постоянного и переменного тока ультравысокого напряжения и крупными базами энергоресурсов	161
4.2.3.1. Связи между системами постоянного и переменного тока УВН и поставляющими электроэнергию генерирующими станциями	161
4.2.3.2. Влияние систем передачи переменного и постоянного тока УВН на безопасность генерирующих предприятий	162
4.3. Модели развития электрических сетей Китая	166
4.3.1. Особенности развития электрических сетей Китая	166
4.3.2. Выбор проекта развития электрической сети	168
4.3.3. Анализ уровня надежности проектов развития энергосистем	172
4.4. Оценка экономичности проекта трех синхронных китайских энергосистем УВН	184
4.4.1. Теория и метод проведения анализа	184
4.4.2. Анализ финансовой оценки	187
4.4.3. Анализ конкурентоспособности цены на электроэнергию	187
4.4.4. Оценка национальной экономики	189
4.4.5. Социальный эффект от трех китайских синхронизированных энергосистем УВН	189
Глава 5. Внутренние перенапряжения электрической сети УВН и меры их ограничения	
5.1. Классификация внутренних перенапряжений и уровни перенапряжения в системах УВН	192

5.2. Временное перенапряжение и меры по его ограничению	194
5.2.1. Перенапряжение промышленной частоты и меры по его ограничению	194
5.2.1.1. Факторы, влияющие на перенапряжение промышленной частоты	194
5.2.1.2. Меры по ограничению перенапряжения промышленной частоты	198
5.2.1.3. Длительное перенапряжение промышленной частоты при отключении однофазного замыкания на землю	200
5.2.2. Резонансное перенапряжение и меры по его ограничению	200
5.3. Ток дуги подпитки и меры его ограничения	206
5.3.1. Ток дуги подпитки и напряжение его восстановления	206
5.3.2. Меры по ограничению тока вторичной дуги	206
5.3.3. Специфика самогашения дуги подпитки	208
5.3.4. Выбор сопротивления реактора высокого напряжения в нейтрали	211
5.3.5. Выбор сопротивления управляемого шунтирующего реактора высокого напряжения в нейтрали	213
5.3.6. Выбор быстродействующих заземляющих выключателей	213
5.3.7. Влияние продольной компенсации на переходный процесс тока дуги подпитки	214
5.3.8. Влияние транспозиции фаз на ток вторичной дуги двухцепной линии	215
5.4. Коммутационное перенапряжение и меры по его ограничению	216
5.4.1. Коммутационное перенапряжение при включении и меры по его ограничению	216
5.4.2. Коммутационное перенапряжение на выключателе и меры по его ограничению	220
5.4.2.1. Коммутационное перенапряжение на выключателе при отключении	221
5.4.2.2. Переходное перенапряжение при устранении аварий	222
5.4.2.3. Выбор шунтирующего сопротивления выключателя	224
5.5. Мгновенное переходное перенапряжение и меры по его ограничению	226
5.5.1. Возникновение мгновенного переходного перенапряжения и его влияние на оборудование	226
5.5.2. Особенности мгновенного переходного перенапряжения	227
5.5.3. Меры по ограничению мгновенного перенапряжения	230
5.6. Переходные перенапряжения в линиях передачи постоянного тока и меры по их ограничению	231
5.6.1. Первичные причины возникновения перенапряжений в линиях передачи постоянного тока	231
5.6.2. Меры по ограничению перенапряжений в системе передачи постоянного тока	233
5.6.3. Эффект ограничения перенапряжений в системах передачи постоянного тока	236
Глава 6. Грозовые перенапряжения и грозозащита сетей ультравысокого напряжения	
6.1. Грозовой разряд и его основные характеристики	247
6.1.1. Механизм образования грозового разряда	247
6.1.2. Количественные характеристики грозового разряда	249
6.1.3. Грозовые перенапряжения	252
6.2. Грозозащита воздушных линий ультравысокого напряжения	253
6.2.1. Особенности грозозащиты воздушных линий УВН	253
6.2.2. Методы расчета вероятности грозовых отключений на ВЛ УВН	254

6.2.2.1. Метод расчета отключений, вызванных обратными перекрытиями	255
6.2.2.2. Методика расчета грозовых отключений, вызванных боковыми ударами	257
6.2.3. Практическое применение средств грозозащиты на ВЛ УВН	260
6.2.3.1. Грозозащита одноцепных ВЛ переменного тока 1000 кВ	260
6.2.3.2. Грозозащита двухцепных ВЛ переменного тока 1000 кВ	262
6.2.3.3. Грозозащита линий ультравысокого напряжения постоянного тока	265
6.3. Грозозащита трансформаторных и преобразовательных подстанций УВН	267
6.3.1. Методы моделирования грозозащиты трансформаторных и преобразовательных подстанций УВН	267
6.3.2. Грозозащита трансформаторных подстанций УВН	269
6.3.2.1. Защита оборудования трансформаторных подстанций УВН от прямых ударов молнии	269
6.3.2.2. Защита электрического оборудования подстанций от перенапряжения, вызываемого набегающей грозовой волной	270
6.3.3. Грозозащита преобразовательных подстанций ультравысокого напряжения	272
6.3.3.1. Защита оборудования преобразовательных подстанций от прямого удара молнии	272
6.3.3.2. Защита электрического оборудования от перенапряжения, возникающего вследствие набегающей грозовой волны	272
Глава 7. Характеристики и выбор внешней изоляции электроустановок УВН	
7.1. Характеристики электрической прочности внешней изоляции электроустановок УВН	275
7.1.1. Классификация внешней изоляции электроустановок УВН	275
7.1.2. Характеристики электрической прочности воздушных промежутков ВЛ УВН	275
7.1.2.1. Характеристики электрической прочности воздушных промежутков на опорах ВЛ переменного тока	276
7.1.2.2. Характеристики электрической прочности воздушных промежутков на опорах ВЛ постоянного тока	284
7.1.3. Характеристики электрической прочности воздушных промежутков на трансформаторных и преобразовательных подстанциях УВН	289
7.1.3.1. Характеристики электрической прочности классических воздушных промежутков на трансформаторных подстанциях УВН	290
7.1.3.2. Характеристики электрической прочности типичных воздушных промежутков на преобразовательных подстанциях УВН	292
7.1.4. Корректировка с учетом высоты над уровнем моря	294
7.1.5. Характеристики электрической прочности загрязненных изоляторов для электроустановок УВН	296
7.1.5.1. Характеристики электрической прочности загрязненных изоляторов переменного тока	296
7.1.5.2. Характеристики электрической прочности загрязненных изоляторов при постоянном напряжении	297
7.2. Выбор воздушных промежутков ВЛ УВН	299
7.2.1. Воздушные промежутки между проводом и опорой, соответствующие требованиям при воздействии рабочего напряжения	299

7.2.2. Воздушные промежутки между проводом и опорой при коммутационных перенапряжениях	301
7.2.3. Воздушные промежутки между проводом и опорой при грозовых перенапряжениях	304
7.2.4. Рекомендуемая длина воздушных промежутков «провод—опора» для ВЛ УВН	305
7.3. Выбор воздушных промежутков на трансформаторных и преобразовательных подстанциях УВН	307
7.3.1. Воздушные промежутки при воздействии рабочего напряжения	307
7.3.2. Воздушные промежутки при воздействии коммутационных перенапряжений	308
7.3.2.1. Трансформаторные подстанции	308
7.3.2.2. Преобразовательные подстанции	310
7.3.3. Воздушные промежутки при грозовых перенапряжениях	311
7.3.3.1. Трансформаторные подстанции	311
7.3.3.2. Преобразовательные подстанции	312
7.3.4. Рекомендуемая длина воздушных промежутков для трансформаторной подстанции УВН	312
7.3.5. Рекомендуемая длина воздушных промежутков на стороне постоянного тока преобразовательной подстанции УВН	313
7.4. Выбор изоляторов ультравысокого напряжения	315
7.4.1. Выбор типа и количества тарельчатых изоляторов на ВЛ	315
7.4.2. Выбор изоляции для электрооборудования трансформаторных и преобразовательных подстанций	318
7.5. Уровень изоляции электрооборудования УВН	321
7.5.1. Параметры разрядника (ОПН)	321
7.5.2. Уровни изоляции электрооборудования переменного тока УВН	324
7.5.2.1. Выдерживаемое напряжение переменного тока	324
7.5.3. Уровни изоляции электрооборудования постоянного тока УВН	327
Глава 8. Электромагнитная среда вблизи электроустановок для передачи электроэнергии УВН	
8.1. Электромагнитная среда вблизи электроустановок УВН	332
8.2. Электрическое и магнитное поля вблизи электроустановок УВН	333
8.2.1. Электрическое и магнитное поля вблизи электроустановок переменного тока УВН	333
8.2.1.1. Электрическое поле промышленной частоты, образуемое ВЛ УВН переменного тока	333
8.2.1.2. Электрическое поле промышленной частоты на трансформаторной подстанции УВН	336
8.2.1.3. Магнитное поле промышленной частоты, образуемое воздушными линиями УВН переменного тока	338
8.2.1.4. Магнитное поле промышленной частоты на трансформаторной подстанции УВН	339
8.2.2. Предельные значения электрического и магнитного полей промышленной частоты вблизи ВЛ УВН переменного тока	340
8.2.3. Суммарные электрическое и магнитное поля постоянного тока вблизи электроустановок УВН постоянного тока	342
8.2.4. Предельные значения суммарного электрического и магнитного полей постоянного тока на ВЛ постоянного тока УВН	348

8.2.5. Влияние электрического и магнитного полей напряжения промышленной частоты на окружающую среду	349
8.3. Излучение акустического шума при работе электроустановок, используемых для передачи и преобразования переменного электрического тока УВН	351
8.3.1. Физические характеристики акустического шума и эквивалентный уровень звука излучения, корректированный по кривой А	351
8.3.2. Физические механизмы генерации акустического шума при передачи электроэнергии	353
8.3.3. Методики расчета уровней звука излучения коронного акустического шума, излучаемого объектами передачи и преобразования тока УВН	361
8.3.4. Предельно допустимые уровни акустического шума, который излучается во время эксплуатации ВЛ электропередачи УВН	364
8.3.5. Предельные значения уровней акустического шума для трансформаторных и преобразовательных подстанций УВН	365
8.3.6. Меры по снижению акустического шума от объектов передачи и преобразования тока УВН	366
8.4. Радио- и телевизионные помехи от ВЛ электропередачи УВН	369
8.4.1. Характеристика радио- и телевизионных помех от ВЛ и их воздействие на окружающую среду	369
8.4.1.1. Радиопомехи	369
8.4.1.2. Телевизионные помехи	373
8.4.2. Расчет радиопомех от воздушных линий электропередачи	373
8.4.3. Предельные значения радиопомех от ВЛ УВН	374
8.4.4. Методы снижения радиопомех от ВЛ электропередач УВН	375
8.5. Потери на коронный разряд ВЛ электропередач УВН	377
8.5.1. Явление коронного разряда воздушных линий электропередач	377
8.5.2. Эксперименты по изучению коронного разряда на ВЛ электропередачи УВН	377
8.5.3. Расчет потерь на коронный разряд на ВЛ переменного тока	381
8.5.4. Расчет потерь электроэнергии на ВЛ постоянного тока	383
Глава 9. Оборудование линий электропередачи ультравысокого напряжения	
9.1. Опоры воздушных ЛЭП ультравысокого напряжения	386
9.1.1. Особенности конструкции опор ЛЭП УВН	386
9.1.1.1. Типы конструкций опор	386
9.1.1.2. Принципы проектирования и важнейшие технологические особенности	388
9.1.2. Разработка современных опор ВЛ УВН	389
9.1.2.1. Определение расчетной нагрузки	389
9.1.2.2. Оптимизация проектирования конструкций опор	389
9.1.3. Фундамент опоры	395
9.1.3.1. Заглубление и обратная засыпка фундамента	395
9.1.3.2. Фундамент с выемкой первоначального грунта	396
9.1.3.3. Фундамент с выполнением углубления для расширяющейся внизу свай	396
9.1.3.4. Фундамент в скальной породе	396
9.1.3.5. Комплексные типы фундаментов	397
9.2. Провода и заземление воздушной ЛЭП УВН	398
9.2.1. Типы конструкций проводов и заземлений ВЛ УВН	398

9.2.1.1. Типы конструкций проводов ВЛ УВН	398
9.2.1.2. Типы конструкций заземления ВЛ УВН	400
9.2.1.3. Провода нового типа на ВЛ УВН в КНР	401
9.2.2. Колебания проводов ВЛ УВН	409
9.2.2.1. Вибрация проводов ВЛ	409
9.2.2.2. Пляска проводов	413
9.2.2.3. Колебания проводов между распорками	416
9.3. Изоляторы ВЛ электропередачи УВН	418
9.3.1. Изоляторы ВЛ УВН переменного тока	418
9.3.1.1 Стеклянные и фарфоровые подвесные изоляторы тарельчатого типа	418
9.3.1.2 Полимерный стержневой подвесной изолятор	419
9.3.2. Изоляторы ВЛ УВН постоянного тока	421
9.3.2.1. Фарфоровые и стеклянные подвесные изоляторы тарельчатого типа	422
9.3.2.2. Полимерные подвесные изоляторы стержневого типа	423
9.4. Дополнительное оборудование для ВЛ УВН	426
9.4.1. Распорки для проводов расщепленной фазы ВЛ электропередачи	426
9.4.2. Соединительная арматура	427
9.4.3. Натяжные гирлянды	427
9.4.4. Экранирующие и выравнивающие напряженность электрического поля кольца	428
9.4.5. Изоляционная подвеска шлейфов	429

Глава 10. Трансформаторные подстанции и электрооборудование переменного тока УВН

10.1. Трансформаторные подстанции УВН	431
10.1.1. Распределительные устройства на трансформаторных подстанциях УВН	431
10.1.2. Электрическое оборудование на трансформаторных подстанциях УВН	432
10.1.3. Схема размещения подстанций УВН	437
10.2. Трансформаторы и шунтирующие реакторы УВН	442
10.2.1. Трансформаторы УВН	442
10.2.1.1. Конструкция трансформаторов УВН	443
10.2.1.2. Ключевые технологии изготовления	444
10.2.1.3. Ключевые технологии испытаний	447
10.2.2. Шунтирующие реакторы УВН	450
10.2.2.1. Конструкция шунтирующего реактора УВН	450
10.2.2.2. Ключевые технологии изготовления и измерения	452
10.2.2.3. Ключевые технологии испытаний	453
10.2.2.4. Управляемые шунтирующие реакторы УВН со ступенчатым регулированием	453
10.3. КРУ УВН	459
10.3.1. Комплектные распределительные устройства с элегазовой изоляцией УВН	459
10.3.2. Выключатель УВН	462
10.3.2.1. Особенности конструкции выключателей УВН	463
10.3.2.2. Китайские выключатели УВН	464
10.3.3. Разъединители УВН	466
10.4. Установки продольной компенсации реактивной мощности УВН	470
10.4.1. Конструкция установок продольной компенсации реактивной мощности УВН	470

10.4.2. Технические условия для установки продольной компенсации УВН	471
10.4.2.1. Выбор номинальных параметров продольного компенсационного оборудования	471
10.4.2.2. Базовые принципы проектирования и меры по ограничению перенапряжения в установках продольной компенсации реактивной мощности	473
10.4.2.3. Особенности производства основного оборудования установки продольной компенсации	476
10.5. Грозовые разрядники УВН	478
10.5.1. Основные функции грозового разрядника (ограничителя перенапряжений) УВН	478
10.5.2. Основные рабочие характеристики грозовых разрядников УВН	479
10.5.2.1. Номинальное напряжение	479
10.5.2.2. Защитные характеристики	479
10.5.2.3. Рассеиваемая энергия	479
10.5.2.4. Характеристики электрической прочности разрядника при напряжении промышленной частоты	480
10.5.3. Проектирование грозового разрядника УВН	480
10.5.3.1. Разрядник с фарфоровой изоляцией	480
10.5.3.2. Разрядник бакового исполнения	481
10.6. Опорные изоляторы и покрышки УВН	482
10.6.1. Опорные изоляторы УВН	482
10.6.1.1. Специальные (геометрические) допуски на опорные изоляционные колонки	482
10.6.1.2. Электрические характеристики	483
10.6.1.3. Механические характеристики	483
10.6.2. Покрышки УВН	483
10.6.2.1. Электрические характеристики	484
10.6.2.2. Механические характеристики	484
10.7. Трансформаторы напряжения и тока УВН	485
10.7.1. Трансформаторы напряжения УВН	485
10.7.1.1. Виды и принципы работы	485
10.7.1.2. Испытания точности трансформаторов напряжения тока УВН	486
10.7.1.3. Электронные трансформаторы напряжения тока УВН	487
10.7.2. Трансформаторы тока УВН	488
10.7.2.1. Технические параметры	488
10.7.2.2. Конструкция	488
10.7.2.3. Электронный трансформатор тока УВН	488
10.8. Сейсмическая защита ключевого электрооборудования преобразовательной подстанции УВН	489
10.8.1. Особенности конструкции электрооборудования УВН	489
10.8.2. Исследования сейсмоустойчивости электрооборудования УВН	489
10.8.3. Проектирование сейсмической защиты электрооборудования УВН	490
Глава 11. Преобразовательная подстанция и оборудование постоянного тока УВН	
11.1. Преобразовательная подстанция УВН	495

11.1.1. Главная электрическая схема стороны постоянного тока преобразовательной подстанции УВН	495
11.1.2. Главная электрическая схема стороны переменного тока преобразовательной подстанции УВН	497
11.1.3. Общая схема размещения преобразовательной подстанции УВН	498
11.2. Преобразователь УВН и его система управления	500
11.2.1. Вентильный преобразователь УВН	500
11.2.1.1. Конструкция вентильного преобразователя УВН	500
11.2.1.2. Электрические характеристики преобразователя	501
11.2.2. Система управления преобразователя ультравысокого напряжения	502
11.3. Преобразовательный трансформатор УВН и слаживающий реактор	504
11.3.1. Преобразовательный трансформатор УВН	504
11.3.1.1. Особенности преобразовательного трансформатора УВН	505
11.3.1.2. Конструкция преобразовательного трансформатора УВН	506
11.3.1.3. Основные технические параметры преобразовательного трансформатора УВН	508
11.3.2. Сглаживающий реактор ультравысокого напряжения	510
11.3.2.1. Конструкция и характеристики сглаживающего реактора ультравысокого напряжения	510
11.3.2.2. Технические требования к сглаживающему реактору ультравысокого напряжения	512
11.4. Фильтрующее оборудование преобразовательной подстанции УВН	513
11.4.1. Фильтрующее оборудование постоянного тока УВН	513
11.4.1.1. Структура и конфигурация фильтрующего оборудования постоянного тока УВН	513
11.4.1.2. Технические требования к фильтрующему оборудованию постоянного тока	515
11.4.1.3. Параметры высоковольтных конденсаторов в фильтрующем оборудовании постоянного тока	516
11.4.2. Фильтрующее оборудование переменного тока УВН	516
11.4.2.1. Структура и конфигурация фильтрующего оборудования переменного тока	516
11.4.2.2. Технические требования к фильтрующему оборудованию переменного тока	518
11.4.2.3. Параметры высоковольтного конденсатора в фильтрующем оборудовании переменного тока	519
11.5. Разрядники преобразовательной подстанции ультравысокого напряжения	519
11.5.1. Виды и особенности разрядников преобразовательной подстанции УВН	519
11.5.2. Конструкция разрядника постоянного тока ультравысокого напряжения	522
11.6. Опорные изоляторы постоянного тока УВН и вводы	523
11.6.1. Специфика загрязнения изоляторов постоянного тока	523
11.6.2. Опорные изоляторы постоянного тока УВН	524
11.6.2.1. Конструкция опорных изоляторов	524
11.6.2.2. Основные технические параметры опорных изоляторов	524
11.6.3. Проходной ввод постоянного тока УВН	526
11.6.3.1. Конструкция и особенности проходного ввода	526

11.6.3.2. Основные технические параметры проходного ввода	527
11.7. Коммутационное оборудование постоянного тока	527
11.7.1. Переключатель режимов работы системы постоянного тока	527
11.7.2. Разъединитель постоянного тока	529
11.7.3. Обходной разъединитель	530
11.8. Измерительные устройства постоянного тока УВН	532
11.8.1. Измерительные устройства постоянного тока	532
11.8.1.1. Электромагнитный трансформатор постоянного тока	533
11.8.1.2. Оптический трансформатор постоянного тока	534
11.8.1.3. Чисто оптический трансформатор постоянного тока	534
11.8.2. Измерительные устройства напряжения постоянного тока	534
11.9. Оборудование защиты и управления постоянного тока УВН	537
11.9.1. Особенности защиты и управления в системе постоянного тока УВН	537
11.9.2. Иерархическая структура системы защиты и управления системы постоянного тока УВН	537
Глава 12. Опыт реализации объектов передачи электроэнергии УВН напряжения в Китае	
12.1. Объекты передачи электроэнергии УВН переменного тока	541
12.1.1. Экспериментальный объект УВН 1000 кВ переменного тока Цзиньдуннань—Наньян—Синмэнь	541
12.1.1.1. Описание объекта	541
12.1.1.2. Трансформаторные подстанции и переключательный пункт	542
12.1.1.3. Линия электропередачи (ЛЭП)	543
12.1.1.4. Пусконаладочные работы и ввод объекта в эксплуатацию	543
12.1.2. Реконструкция экспериментального объекта УВН 1000 кВ переменного тока Цзиньдуннань — Наньян — Синмэнь	545
12.1.2.1. Описание объекта	545
12.1.2.2. Трансформаторные подстанции	545
12.1.2.3. Пусконаладочные работы и эксплуатация объекта	546
12.1.3. Экспериментальный объект УВН 1000 кВ переменного тока Хуайнань — Шанхай	547
12.1.3.1 Описание объекта	549
12.1.3.2. Трансформаторные подстанции	550
12.1.3.3 Линия электропередачи (ЛЭП)	551
12.1.3.4. Пусконаладочные работы и эксплуатация объекта	551
12.2. Объекты передачи электроэнергии постоянного тока УВН	551
12.2.1. Экспериментальный объект постоянного тока УВН ± 800 кВ Сянцзяба — Шанхай	551
12.2.1.1. Описание объекта	551
12.2.1.2. ЛЭП	554
12.2.1.3. Основные параметры оборудования	555
12.2.1.4. Пусконаладочные работы и эксплуатация объекта	556
12.2.2. Объект постоянного тока УВН ± 800 кВ Цзиньпин — Сунань	557
12.2.2.1. Описание объекта	557
12.2.2.2. ЛЭП	559
12.2.2.3. Основные параметры оборудования	560

12.2.2.4. Пусконаладочные работы и эксплуатация объекта	561
12.2.3. Объект постоянного тока УВН ± 800 кВ Хами-юг — Чжэнчжоу	561
12.2.3.1. Описание объекта	561
12.2.3.2. ЛЭП	561
12.2.3.3. Основные параметры оборудования	564
12.2.3.4. Пусконаладочные работы и эксплуатация объекта	565
12.3. Экспериментальные мероприятия по УВН	565
12.3.1. Экспериментальная база переменного тока УВН	565
12.3.2. Экспериментальная база постоянного тока ультравысокого напряжения	571
12.3.3. Экспериментальная база для опор ультравысокого напряжения	576
12.3.4. Экспериментальная база на высокогорье в Тибете	578
12.3.5. Экспериментальная лаборатория по изучению больших мощностей	581
12.3.6. Государственный центр моделирования энергосистем	582
12.3.7. Центр комплексных разработок и проектирования	584
объектов постоянного тока УВН	
12.4. Стандартизация технологий передачи электроэнергии УВН	586
12.4.1. Система стандартизации технологий передачи	586
электроэнергии на переменном токе	
12.4.2. Система стандартизации технологий передачи	588
электроэнергии постоянным током УВН	
12.5. Инновационные технологии в проектах УВН	589
12.5.1. Инновационные технологии в проектах переменного тока УВН	589
12.5.1.1. Уровень инновационных технологий, достигнутый	589
в проектах переменного тока УВН	
12.5.1.2. Устойчивые технологические инновации проектов переменного тока УВН	593
12.5.2. Инновационные технологии в проектах постоянного тока УВН	599
12.5.2.1. Уровень инновационных технологий, достигнутый	599
на объектах постоянного тока УВН	
12.5.2.2. Достигнутые уровни технологических инноваций	610
на объектах постоянного тока УВН	
12.6. Локализация производства оборудования УВН	618
и транспортировка крупногабаритного оборудования	
12.6.1. Возможности производства электрооборудования переменного тока УВН	618
12.6.2. Возможности производства электрооборудования постоянного тока УВН	621
12.6.3. Транспортировка крупногабаритного оборудования	623