Чернова Наталья Владимировна. Методики определения потерь электроэнергии в системах электроснабжения напряжением до 10 кВ : Дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 Казань, 2006 205 с. РГБ ОД, 61:06-5/2948

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ**

**УНИВЕРСИТЕТ**

***На правах рукописи***



ЧЕРНОВА НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА

**МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 10 кВ**

Специальность 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель доктор технических наук, профессор Федотов А.И.

Казань - 2006

ВВЕДЕНИЕ 6

ГЛАВА 1. Методы расчета и нормирования потерь электроэнергии в системах электроснабжения 12

1. Состояние вопроса 12
   1. Нормирование потерь электроэнергии 14
   2. Методы расчета технических потерь мощности и электроэнергии 18
   3. Методика распределения потерь электроэнергии по линиям электропередачи сети 25

® 1.5 Сущность проблемы высших гармоник в электрических сетях 27

1. Основные источники высших гармоник 29
2. Негативное воздействие высших гармоник 36
3. Потери от высших гармоник 39
4. Гармонический анализ 41
5. Выводы 51

ГЛАВА 2. Расчет потерь мощности в однофазных электрических сетях от высших гармоник тока 53

1. Постановка задачи 53

# 2.2. Динамическая модель системы электроснабжения

с несинусоидальной нагрузкой 55

1. Исходные положения 55

^ 2.2.2. Коммутационные функции для связи переменных 58

1. Уравнения системы электроснабжения в области изображений 60
2. Уравнения системы электроснабжения в конечных разностях 61
3. Схема замещения однофазной системы электроснабжения для ® расчета высших гармоник тока 64
4. Расчет гармоник сетевого тока в системе электроснабжения при мгновенной коммутации вентилей 73
5. Схемы замещения системы электроснабжения на стороне переменного тока несинусоидальных нагрузок 76
6. Сравнительный анализ методов расчета несинусоидальных режимов 80
7. Выводы 86

ГЛАВА 3. Расчет потерь мощности от гармонических составляющих в трехфазных сетях переменного тока 87

1. Исходные положения и постановка задачи 87
2. Математическая модель системы электроснабжения при мгновенной коммутации токов 89
3. Исходные уравнения для приведения схемы замещения системы электроснабжения к одной фазе 89
4. Однофазная схема замещения системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой 95
5. Схема замещения системы электроснабжения для расчета потерь электроэнергии от высших гармоник тока при мгновенной коммутации вентилей 101
   1. Схема замещения системы электроснабжения при учете коммутационных процессов в нелинейной наїрузке 108
      1. Приведение схемы замещения системы электроснабжения к одной фазе 108
      2. Схема замещения системы электроснабжения для расчета потерь электроэнергии от высших гармоник тока 118
   2. Выводы 122

ГЛАВА 4. Методика распределения потерь электроэнергии по линиям

электропередачи сети 124

1. Исходные положения 124
2. Оценка погрешности методики в сети с однородной нагрузкой...125
3. Оценка погрешности методики на модельном участке сети.. 125
4. Математический эксперимент на реальном участке сети 130
5. Оценка погрешности методики в сети со смешанной нагрузкой.. 130
6. Оценка погрешности методики на модельном участке сети...130
7. Математический эксперимент на реальном участке сети 136
8. Оценка погрешности методики при отключении потребителей...136
9. Оценка погрешности методики на модельном участке сети... 138
10. Математический эксперимент на реальном участке сети 140
11. Этапы преобразования долевых коэффициентов 140
12. Усовершенствованный алгоритм методики 148
13. Использование коэффициентов распределения, рассчитанных на основе характерных графиков нагрузки 148
14. Использование коэффициентов распределения, соответствующих наименьшей погрешности распределения потерь 149
15. Аппроксимация коэффициентов распределения 153
16. Оценка погрешности методики с аппроксимацией коэффициентов распределения при работе сети с однородной нагрузкой 157
17. Изменение формы характерного графика нагрузки 157
18. Изменение энергопотребления характерного графика нагрузки 161
19. Выводы 167

ГЛАВА 5. Методики оценки потерь энергии в электрической сети 168

1. Методика оценки потерь энергии в линиях электропередачи сети по ограниченной информации 168
2. Основные положения 168
3. Оценка погрешности методики при работе сети с однородной нагрузкой 170
4. Методика оценки потерь энергии в линиях электропередачи сети при дополнительных измерениях 183
5. Основные положения 183
6. Оценка погрешности методики при работе сети с однородной нагрузкой 186
7. Выводы 193

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 194

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 196

**Актуальность темы**

Электрическая энергия - это единственный вид продукции, для передачи которого к потребителям не используются другие ресурсы, кроме нее самой. Поэтому ее потери неизбежны.

Потери электроэнергии в электрических сетях систем электроснабжения - важнейший показатель экономичности их работы, наглядный индикатор состояния системы учета электроэнергии, эффективности энергосбытовой деятельности энергоснабжающих организаций. Актуальной задачей энергосбережения в настоящее время является определение их экономически обоснованного уровня. Для этого необходимо знать с достаточной точностью действительные потери энергии в электрических сетях. Достоверную информацию о действительной величине потерь энергии в линиях электропередачи (ЛЭП) и соответственно разработку нормативов потерь электроэнергии, мероприятий по их уменьшению, а также выявлению коммерческих потерь мощности можно основывать только на системах текущего контроля режима электрической сети во всех узлах нагрузки (НГ).

Однако в сельских распределительных сетях нет ни технических, ни экономических предпосылок в ближайший обозримый период для внедрения высоких технологий по сбору и передаче данных. Реальная ситуация такова, что единственным источником информации об электропотреблении сельских потребителей являются электросчетчики.

Актуальными задачами для таких сетей являются определение поэлементных потерь электроэнергии и оценка их возможного уровня при различных режимах работы потребителей.

Основная проблема нормирования потерь электроэнергии в сельских электрических сетях напряжением 6 - 10 кВ заключается в недостоверном определении потерь энергии в них. В районных электрических сетях

напряжением 6-10 кВ, питающих преимущественно мелких сельских потребителей, практически недоступна информация о графиках нагрузки (ГН) каждого отдельного потребителя ввиду очень большого числа подстанций 10/0,4 кВ и наличия в качестве измерительных приборов только электрических счетчиков. Общепринятые расчетные методы определения и нормирования потерь электроэнергии в таких системах электроснабжения не учитывают эти особенности. Поэтому вопрос по обоснованию норматива потерь, а также их определению во всех элементах электропередачи является для таких сетей очень актуальным.

При оценке потерь энергии в системах электроснабжения также возникает проблема учета высших гармонических составляющих тока и напряжения. Современная нагрузка характеризуется большим количеством нелинейных потребителей, генерирующих ВГ и вносящих, тем самым, искажения в сеть, осложняя работу оборудования, нередко являясь причиной выхода его из строя, создавая дополнительные потери электроэнергии в элементах сети и т. д.

В такой ситуации необходимо правильно рассчитывать потери энергии в сети. Проблема нормирования таких потерь является сейчас очень актуальной. Для того чтобы правильно определять и нормировать потери энергии в таких сетях нужно верно рассчитывать их гармонический состав. Грамотный учет ВГ является одной из составляющих проблемы расчета общих потерь электроэнергии в электрических сетях.

Для расчета потерь мощности от гармоник в электрических сетях систем электроснабжения принято использование методики задающих токов, когда заранее определяются гармоники тока на входе в преобразователь. Определяются они исходя из условия питания преобразователя синусоидальным напряжением. Если же рассматривается выпрямитель, то полагают выпрямленный ток полностью сглаженным. При этом не принимаются во внимание следующие обстоятельства.

Во-первых, при работе преобразователей в сетях низкого напряжения, когда точки их подключения рассредоточены по системе электроснабжения, напряжение их питания отличается от синусоидального, так как сами же преобразователи вносят высшие гармоники в сеть. Причем искажения питающего напряжения различаются по точкам подключения. Во-вторых, при независимом определении гармоник не принимается во внимание фазовый сдвиг напряжений питания, не учет которого обусловливает ошибку в расчетах. В-третьих, изменение характера нагрузки требует перерасчета исходных токов задания гармоник, причем не ясно, на каком этапе можно считать выпрямленный ток полностью сглаженным, а на каком нельзя.

При этом практически отсутствуют математически обоснованные схемы замещения преобразователей совместно с нагрузкой при их динамических режимах работы, пригодные для расчета гармонических составляющих тока и напряжения. Схемы замещения системы электроснабжения относительно гармонических составляющих включают все элементы системы электроснабжения, за исключением собственно преобразователей, которые вводятся в эти схемы задающими токами.

Стоит острая необходимость разработки математических моделей преобразовательной нагрузки разного характера в виде, максимально приближенном к общепринятым схемам замещения систем электроснабжения. При этом необходимо иметь возможность расчета гармоник как в статических, так и в динамических режимах работы преобразователей.

Целью диссертационной работы является разработка методик определения и оценки потерь электроэнергии применительно к сетям напряжением 6-10 кВ с ограниченными инструментальными возможностями, а также разработка математических моделей однофазного и трехфазного вентильных преобразователей для расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения напряжением от высших гармоник.

При этом решались следующие задачи: разработка методики

определения и оценки потерь электроэнергии в системах электроснабжения магистрального типа с большим количеством присоединений напряжением 6-10 кВ в зависимости от объема исходной информации; определение гармонического состава токов в нестационарных режимах работы системы электроснабжения; разработка математических моделей однофазных и трехфазных вентильных преобразователей для составления их гармонических схем замещения и расчета потерь электроэнергии от высших гармоник.

Научная новизна работы заключается в следующем:

* разработана математическая модель системы электроснабжения с несинусоидальной нагрузкой, сочетающая ее описание в конечно-разностном виде и в локальных комплексных переменных, для расчетов короткого замыкания и определения потерь электроэнергии от гармонических составляющих токов при возмущениях режима со стороны электрической сети и со стороны выпрямительной нагрузки;
* получены математические модели систем электроснабжения с несинусоидальной нагрузкой в установившемся режиме, на основании которых составлены их схемы замещения для определения потерь электроэнергии от гармоник тока;
* разработана методика оценки потерь электроэнергии в магистральных системах электроснабжения напряжением 6-10 кВ по каждой линий электропередачи на основе показаний счетчиков;
* разработаны методики оценки потерь электроэнергии в целом в магистральных системах электроснабжения напряжением 6-10 кВ при вариации режимов электроприемников по параметрам базового режима.

Практическая ценность работы. Разработанные методики определения потерь электроэнергии в системах электроснабжения напряжением 6-10 кВ позволяют поэлементно определять потери электроэнергии в зависимости от объема имеющейся исходной информации и обосновывать энергосберегающие мероприятия.

Разработанные схемы замещения вентильных преобразователей обеспечивают корректный расчет перенапряжений в системах

электроснабжения на резонансных гармониках и позволяют выбрать оптимальные решения по их ограничению.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается результатами математических экспериментов, использованием при решении поставленных задач корректных математических методов, физической обоснованностью применяемых допущений, сопоставлением с известными, опубликованными в научной литературе исследованиями.

Основные положения, выносимые на защиту:

* методика расчета гармоник тока и напряжения для определения потерь электроэнергии от высших гармоник в неустановившихся режимах работы системы электроснабжения;
* математические модели однофазного и трехфазного вентильных преобразователей и их схемы замещения для расчета потерь электроэнергии от высших гармоник в системах электроснабжения;
* методика оценки потерь электроэнергии по элементам электрической сети по величине суммарных потерь во всей системе электроснабжения;
* методики оценки потерь электроэнергии в электрической сети в целом по величине потерь электроэнергии в отдельных элементах систем электроснабжения

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах: X, XI Международных научно­технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2004, 2005 гг.); V Международной конференции "Компьютерное моделирование 2004" (СПбГПУ, г. Санкт- Петербург, 2004 г.); V Всероссийской научно-технической конференции "Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике" (ЧТУ

им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, 2004 г.); V и VI Международных симпозиумах «Ресурсоэффективность. Энергосбережение» (г. Казань, 2004, 2005 гг.); XVI Всероссийской межвузовской научно-технической

конференции "Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика, диагностика технических систем, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий" (ВАУ, г. Казань, 2004 г.); Международной научно-технической конференции «XII Бенардосовские чтения» (г. Иваново, 2005г.); Межвузовской молодежной конференции "Студенчество. Интеллект. Будущее" (г. Н.Челны, 2005г.); II Республиканской научно-технической конференции студентов и аспирантов "Автоматика и электронное приборостроение" (г. Казань, 2005г.); Научной сессии ученых Альметьевского государственного нефтяного института по итогам 2005 г.; X Всероссийской конференции Ассоциации технических университетов России и представительств отраслевых академий наук при СПбГПУ по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах», (г. Санкт-Петербург, 2006 г.), а также регулярно обсуждались на аспирантско - магистерских семинарах КГЭУ.

* 1. Выводы

В данной главе рассмотрены 2 методики оценки потерь электроэнергии в *ф* сельских электрических сетях напряжением 6-10 кВ. Методика оценки

потерь энергии в ЛЭП сети по ограниченной информации предназначена для сетей с небольшими инструментальными возможностями. Она позволяет с высокой точностью производить оценку потерь энергии в линиях сети в случаях, когда известны лишь показания счетчиков в центрах питания.

Методика оценки потерь энергии в ЛЭП сети при дополнительных измерениях предназначена для сетей, имеющих возможность получения достаточно полной информации о режимах работы сети. Она позволяет оценивать потери энергии в линиях сети с точностью, которая сопоставима с точностью получения исходных данных.

® Исследования точности оценки потерь электроэнергии с помощью

рассмотренных методик производились на основе модельного и реального участков сетей в условиях изменения форм графиков и энергопотребления узлов.

Рассмотренные методики являются простыми, удобными в применении и могут с успехом использоваться для оценки потерь электроэнергии в ЛЭП сетей сельского электроснабжения напряжением 6 - 10 кВ в зависимости от возможностей получения исходной информации.

Полученная динамическая математическая модель вентильного преобразователя на стороне переменного тока позволяет использовать ее при расчетах токов короткого замыкания в системе электроснабжения и в случае определения гармонических токов и напряжений в её динамических режимах.

Математически строго обоснована схема замещения вентильного преобразователя для определения гармоник тока и напряжения в установившихся режимах системы электроснабжения. Показано, что данная схема замещения представляет собой сочетание источника напряжения и источника тока. При этом напряжение источника напряжения определяется величиной тока нагрузки в момент коммутации вентилей и не зависит от рассчитываемой гармоники тока. Гармонический состав источника тока определяется токами коммутации.

Сравнительные расчеты показали, что расчеты потерь мощности в системах электроснабжения от высших гармоник по известной методике задающих токов при определенных соотношениях параметров дают ошибку в десятки процентов. Разработанная схема замещения позволяет вести расчеты потерь мощности при любом соотношении параметров системы электроснабжения и выпрямительной нагрузки.

На основе математического аппарата локального преобразования Фурье получена схема замещения трехфазного вентильного управляемого преобразователя, позволяющая рассчитывать токи высших гармоник в системе электроснабжения. Доказано, что при отсутствии коммутации схема замещения сводится к источнику напряжения и комплексному сопротивлению нагрузки. При этом влияние сети на схему замещения сказывается через величину угла управления, который зависит от питающего напряжения при заданном средневыпрямленном токе, величина которого

определяется технологическим процессом и поддерживается системой регулирования неизменной.

При учете коммутационных процессов в схему замещения дополнительно входят три источника тока, обусловленных протеканием токов коммутации. В результате расчет токов высших гармоник в системе электроснабжения и соответствующих потерь мощности происходит в два этапа: вначале рассчитывается режим работы системы электроснабжения при условии номинального напряжения на вентильных преобразователях, а затем корректируются токи коммутации, углы управления и производится повторный расчет гармоник.

Показано, что при применении методики распределения потерь электроэнергии в системе электроснабжения по ЛЭП к системам электроснабжения, для которых характерна многоступенчатость графиков нагрузки, а также разнородность характера нагрузки относительная погрешность расчета потерь энергии в некоторых линиях сети достигает недопустимых величин и необходимо вносить коррективы в ее положения.

Внесены изменения в долевые коэффициенты и алгоритм упомянутой выше методики и разработана методика распределения потерь электроэнергии по ЛЭП сети, которая позволяет с достаточной точностью производить оценку потерь электроэнергии в ЛЭП сетей в случаях, когда известны лишь показания счетчиков в центрах питания.

Разработаны методики, позволяющие с высокой точностью производить оценку потерь электроэнергии в системах электроснабжения в случаях, когда известны только показания счетчиков в центрах питания и при возможности получения значений активных мощностей в течение исследуемого периода времени.