

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ"(НИУ)
Факультет «Энергетический»

РЕФЕРАТ

Группа Э – 441

Желнина Ксения Валерьевна 

на тему: «Передовые мировые решения в области внедрения в
электроэнергетике технологий постоянного тока ультравысокого
напряжения»

Научный руководитель: Гольдштейн Михаил Ефимович, к.т.н., профессор

19.11.2015 

Челябинск 2015

АННОТАЦИЯ

Передовые мировые решения в области внедрения в электроэнергетике технологий постоянного тока ультравысокого напряжения. – Челябинск: ЮУрГУ, 2015, 40 с., 24 илл., 1 табл. Библиография литературы – 19 наименований.

В работе приводится история развития электропередач и вставок постоянного тока, особенности применения на их конечных подстанциях преобразователей тока и преобразователей напряжения, а также их функции в управлении режимами энергосистем. Приведены их технико-экономических параметры, показана роль передач и вставок постоянного тока, внедряемых в мире и их особые режимы, позволяющие улучшить параметры качества электроэнергии.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Введение | 4 |
| 1. Что дает применение технологий постоянного тока в электроэнергетике | 6 |
| 2. Передачи и вставки постоянного тока на базе преобразователей тока | 12 |
| 2.1. Преобразователи тока | 12 |
| 2.2. Схемы и режимы передач и вставок постоянного тока на базе преобразователей тока | 21 |
| 3. Передачи и вставки постоянного тока на базе преобразователей напряжения | 23 |
| 3.1. Преобразователи напряжения | 23 |
| 3.2. Схемы и режимы передач и вставок постоянного тока на базе преобразователей напряжения | 30 |
| 4. Особые режимы передач и вставок постоянного тока в энергосистеме | 32 |
| 4.1. «Гибридные» линии | 33 |
| 4.2. Подключение возобновляемых источников энергии к энергосистеме | 35 |
| Заключение | 38 |
| Библиографический список | 39 |

Введение

В настоящее время для выработки электрической энергии, ее передачи на расстояние, распределения и потребления применяется в основном переменный ток. Это объясняется прежде всего возможностью трансформации переменного напряжения, а также и тем, что электродвигатели переменного тока по своей конструкции значительно проще, и, следовательно, надежнее электродвигателей постоянного тока [1, 328]. Однако аварийные отключения электроэнергии во многих странах мира продемонстрировали уязвимость энергосистем переменного тока. Примером такой аварии, произошедшей 14 августа 2003 года в США, является «Великий блэкаут-2003». После короткого замыкания в сетях First Energy Corp. оказались обесточены поначалу всего три ЛЭП на северо-востоке США. После этого одна за другой стали отключаться перегруженные электростанции и подстанции, территория в 24 тысячи километров оказалась обесточенной. Авария затронула восемь штатов США и канадскую провинцию Онтарио, где проживали свыше 50 миллионов человек. Без света остались крупнейшие города региона — Детройт, Нью-Йорк, Кливленд, Оттава, Торонто. Отключились более сотни электростанций, общий ущерб достиг 6 миллиардов долларов. На ликвидацию аварии ушло более суток [2, 4].

Одним из направлений решения проблемы каскадных отключений электроэнергии, приводящих к невероятным экономическим потерям, является внедрение в электроэнергетику технологий постоянного тока. Благодаря применению силовых полупроводниковых устройств передаваемая мощность становится регулируемой и управляемой [3, 8]. Вследствие этого уменьшается вероятность потери электропитания не только при локальных авариях, но и при больших системных отключениях.

Электропередачи постоянного тока (ППТ) имеют ряд положительных свойств по сравнению с передачами переменного тока:

- меньшие капитальные затраты на сооружение воздушных ЛЭП сверхвысокого напряжения на дальние расстояния;
- при объединении больших энергосистем между собой появляется возможность подключать электрические сети с различными частотами;
- снижение электрических потерь в ЛЭП, или применение меньшего сечения проводов ЛЭП;
- отсутствие ограничений передаваемой мощности по условиям устойчивости энергосистем;
- снижение токов короткого замыкания при объединении энергосистем или подключении электростанций.

Поэтому применение высоковольтных линий, работающих на постоянном токе, актуально.

Цель реферата – на базе библиографического анализа рассмотреть и определить перспективу внедрения постоянного тока в электроэнергетику для обеспечения надежности и оптимальных технико-экономических параметров энергосистем.

В задачи входит определение положительных свойств и роли передачи электрической энергии с помощью постоянного тока, рассмотрение особенностей основных типов устройств преобразования переменного тока в постоянный и обратно, проведение их сравнительной характеристики и выявление областей их применения.

1. Что дает применение технологий постоянного тока в электроэнергетике

В настоящее время технологии высоковольтной передачи электрической энергии постоянным током делятся на две группы. К первой из них относятся ППТ, где электрическая энергия передается на какое-то расстояние с помощью воздушной или кабельной линии постоянного тока (рисунок 1 а). Ко второй – вставки постоянного тока (ВПТ), в которых ЛЭП отсутствует. Все звено постоянного тока расположено на одной подстанции, на которую заходят линии переменного тока от связываемых энергосистем (рисунок 1 б) [1, 329]. ВПТ применяются для обеспечения устойчивой работы энергосистем и связи энергосистем, работающих на разной частоте.

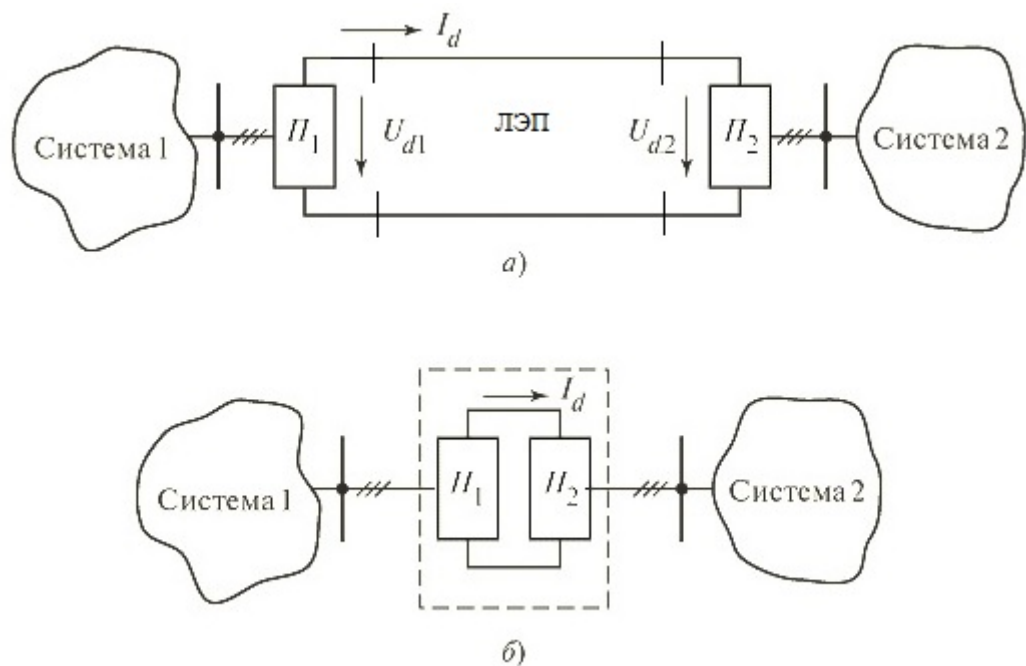


Рисунок 1 – Структурные схемы ППТ (а) и ВПТ (б)

Электропередачи постоянного тока выполняют по униполярной и биполярной схеме. Первая схема (рис. 2) имеет один полюс, а для возвращения тока используется земля или море. Это существенно снижает

затраты на сооружение ЛЭП [4, 7]. Использование земли для возврата тока имеет и отрицательный эффект – коррозионное разрушение металлических сооружений [1, 346], прилегающих к трассе ЛЭП.

По такой схеме выполнен целый ряд электропередач: Италия – о. Сардиния в Средиземном море, Швеция – Дания через пролив Скагеррак в Балтийском море и другие. На электропередаче Швеция – Финляндия, которая является самой мощной из униполярных передач (500 МВт, 400 кВ, 230 км), проложен кабель длиной 200 км лишь с одной соединительной муфтой [1, 346].

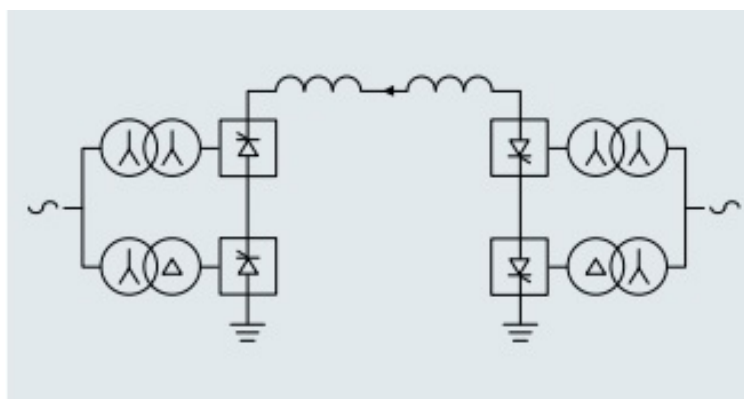


Рисунок 2 – Схема униполярной ППТ

Биполярная электропередача (рис. 3) является сочетанием двух униполярных и состоит из положительного и отрицательного полюса. При равной нагрузке полупедей ток в земле равен нулю [4, 7]. По биполярной схеме выполнены все мощные и дальние ППТ: Итайпу (Бразилия), Тихоокеанская (США), Кабора Басса – Апполо (Мозамбик – ЮАР). По этой же схеме строилась и электропередача Экибастуз-Центр [1, 347].

Свойства линий переменного тока зависят от их длины. Если их пропускная способность уменьшается с увеличением длины передачи, и требуются дополнительные инженерные решения, в ППТ такая зависимость отсутствует. Поэтому ППТ является эффективным средством передачи больших мощностей на дальние расстояния, когда с помощью линии

переменного тока задача или не может быть решена, или слишком затратна [1, 329].

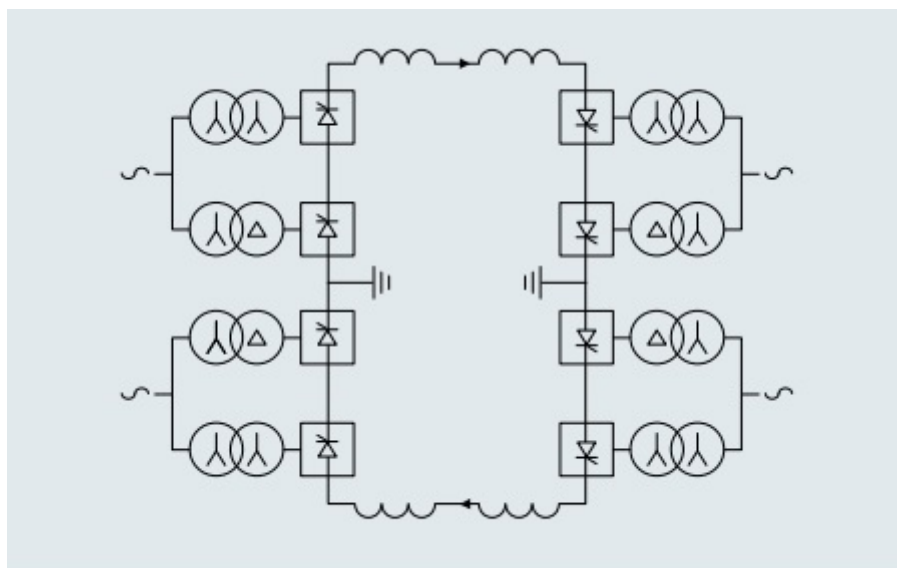


Рисунок 3 – Схема биполярной ППТ

Существенны выгоды постоянного тока для кабельных линий, поскольку условия работы изоляции кабелей на постоянном напряжении несравненно легче, чем на переменном. Благодаря этому пропускная способность кабеля, работающего при постоянном напряжении, в 2 – 4 раза выше, чем у того же кабеля, работающего при переменном напряжении. Кроме того, при использовании постоянного тока отпадает само понятие критической длины кабеля, что позволяет делать их достаточно длинными. Так, например, кабельная линия постоянного тока, связывающая энергосистемы Швеции и Финляндии и проложенная по дну Балтийского моря, имеет длину 200 км при напряжении полюса 400 кВ [5, 170; 1, 330].

Кабельные линии постоянного тока высокого напряжения с передаваемой мощностью в сотни мегаватт могут применяться и для ввода мощности в центры крупных городов и промышленных районов, которые занимают большие территории и потребляют весьма значительные мощности. Так, например, в Москве эти мощности составляют 35 – 40, в Берлине – до 100, в Нью-Йорке (Манхеттен) – до 500 МВт/км². Причем эти

мощности имеют тенденцию к возрастанию. Сооружение крупных электростанций в центральной части города нецелесообразно по многим причинам, в том числе и экологическим. Поэтому мощности нужно вводить в центр города с его окраин или из пригородов, где возможно сооружение подстанций сверхвысокого напряжения, куда передается энергия от удаленных электростанций, а затем эту мощность передавать в центр города по кабельным линиям, так называемым глубоким вводам. Глубокий ввод мощности в город по кабелям постоянного тока имеет и еще одно преимущество, заключающееся в том, что при этом не увеличиваются токи коротких замыканий и исключаются мероприятия по их ограничению или замене коммутационных аппаратов, как это было бы при использовании ввода на переменном токе.

Поскольку как в ППТ, так и в ВПТ мощность передается через звено постоянного тока, то появляется полная развязка энергосистем по частоте. С помощью ППТ и ВПТ можно связывать системы, работающие с разной номинальной частотой (ВПТ мощностью 300 МВт Шин-Шинано и Сакума, Япония для связи энергосистем с частотой 50 и 60 Гц) или с одной номинальной частотой, но несинхронно (ВПТ мощностью 1000 МВт Россия – Финляндия в г. Выборге, соединяющая сети 330 кВ и 400 кВ), а также системы с одной номинальной частотой, в которых применяются разные законы регулирования. И во всех этих случаях может быть обеспечена реверсивная работа передачи.

Важно отметить при этом, что преобразователи ППТ и ВПТ оснащены весьма быстродействующей системой автоматического регулирования. Поэтому возмущения, возникшие в результате аварии в одной из связываемых систем, не передаются в другую, как это происходит по линиям переменного тока [1, 330].

Большое влияние имеет экономический фактор. Сравнение стоимости воздушной ЛЭП электропередачи переменного и постоянного тока в

зависимости от длины линии приведено на рисунке 4. Это сравнение показывает, что электропередача переменного тока дешевле электропередачи постоянного тока при длине линии меньше «экономической», но дороже при длине линии больше «экономической». «Экономическая» длина находится в пределах 400 – 700 км для воздушных линий в зависимости от удельной стоимости электропередачи на единицу длины линии. Для кабельных линий «экономическая» длина находится в пределах 25 – 50 км [6, 7].



Рисунок 4 – Сравнение стоимости воздушных линий постоянного и переменного тока

В передаче электроэнергии переменным током значительное влияние на работу энергосистем оказывает устойчивость. Генераторы систем должны работать синхронно с одинаковыми номинальными частотами. При различных видах возмущений система должна восстановить прежний режим, иначе в системах возникают «качания» – опасный ненормальный режим, отражающийся на работе всей энергосистемы [7, 11], приводящий к ее распаду и прекращению питания всех ее потребителей. Применяя постоянный ток для межсистемных связей, мы получим не жесткую, а достаточно гибкую несинхронную связь. Появляется возможность независимого регулирования частоты в обеих системах и будет значительно меньшее взаимное влияние систем друг на друга при различных видах возмущений [8,18].

Следует отметить, что мощность, передаваемая по линии переменного тока, зависит от угла сдвига δ между векторами напряжения на шинах передающего и приемного концов передачи. Угол увеличивается с ростом длины линии, а на постоянном токе такая зависимость отсутствует. Следовательно, предел передаваемой мощности, определяемый статической и динамической устойчивостью, в ППТ отсутствует.

Статистика отказов ППТ собирается и оценивается рабочими группами GIGRE и IEEE. Результаты анализа, проведенного ими, показывают, что надежность ППТ высокая и соизмерима с надежностью электропередач переменного тока. Готовность ППТ оценивается выше 90 % [6, 10].

Таким образом, передачи постоянного тока не имеют аналогов среди электропередач переменного тока на большие расстояния в связи с их технико-экономическими показателями. Передаваемые при этом мощности характеризуются минимальными потерями, тем самым увеличивая качество электроэнергии. Кроме того, повышается надежность ППТ, так как вероятность обрыва двух полюсов линий постоянного тока меньше, чем вероятность обрыва фаз линий электропередач.

2. Передачи и вставки постоянного тока на базе преобразователей тока

Для работы концевых подстанций ППТ требуются устройства, позволяющие преобразовывать переменный ток в постоянный (выпрямители) и постоянный в переменный (инверторы). Первые ППТ появились на базе преобразователей тока (ПТ). Это связано с тем, что эти преобразователи реализовывались первоначально на управляемых ртутных вентилях, а затем на тиристорах – приборах, которые включались сигналом управления, а выключались, когда их ток снижался до нуля [1, 336]. И сегодня ППТ ультравысокого напряжения большой мощности строятся на ПТ, стоимость применяемых в них тиристоров существенно ниже, чем тиристоров и силовых транзисторов, которые могут и выключаться током управления.

2.1. Преобразователи тока

Основой ПТ на ППТ является трехфазная мостовая схема. Схема замещения преобразовательного моста (рис. 5) одинакова для выпрямителя и инвертора, различие проявляется лишь в численных значениях параметров режима. Питаящая система представлена трехфазной системой симметричных и синусоидальных ЭДС и эквивалентным индуктивным сопротивлением x_c . Трансформатор преобразователя представлен сопротивлением рассеяния x_T [1, 354].

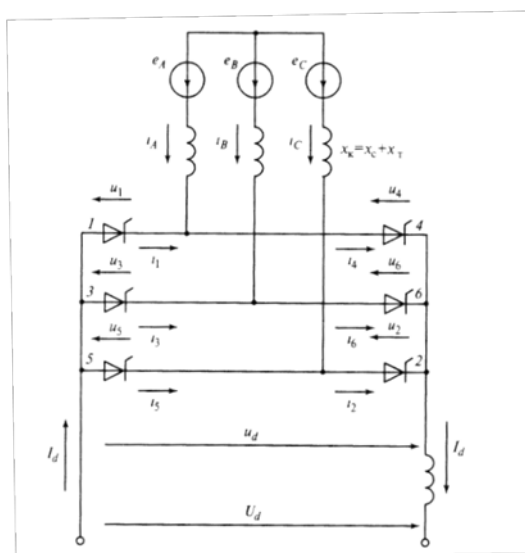


Рисунок 5 – Схема замещения преобразовательного моста

Тиристор включается при положительном напряжении в момент появления тока в цепи управления. Интервал времени между моментом реального включения и углом естественного включения α_0 называется углом запаздывания включения α . Вследствие соизмеримости тока нагрузки преобразователя с номинальным током, в индуктивностях фаз трансформатора и системы запасается достаточное количество энергии, поэтому процесс перехода тока с заканчивающего свою работу тиристора на тиристор, вступающий в работу, происходит не мгновенно, а в течение определенного времени, которое характеризует угол коммутации γ [1, 377].

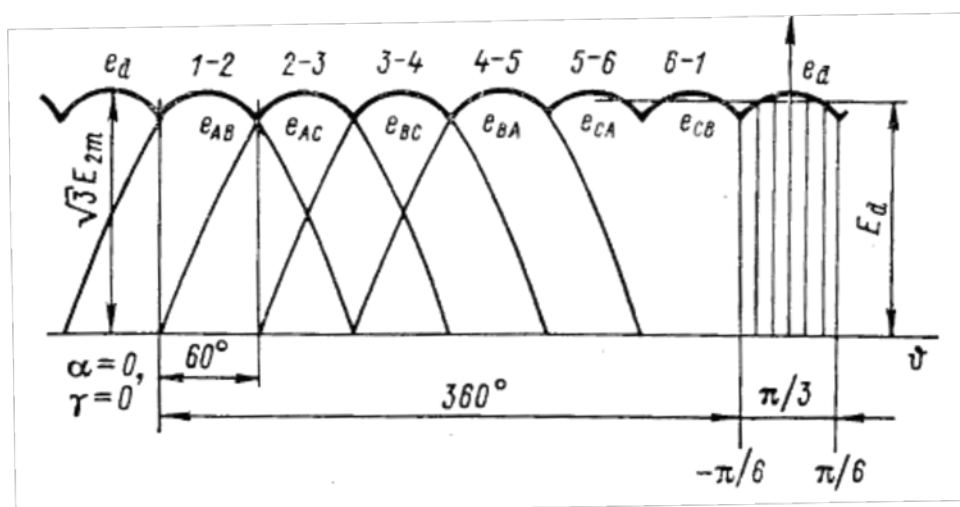


Рисунок 6 – Кривая и постоянная составляющая ЭДС выпрямителя при $\alpha=0$

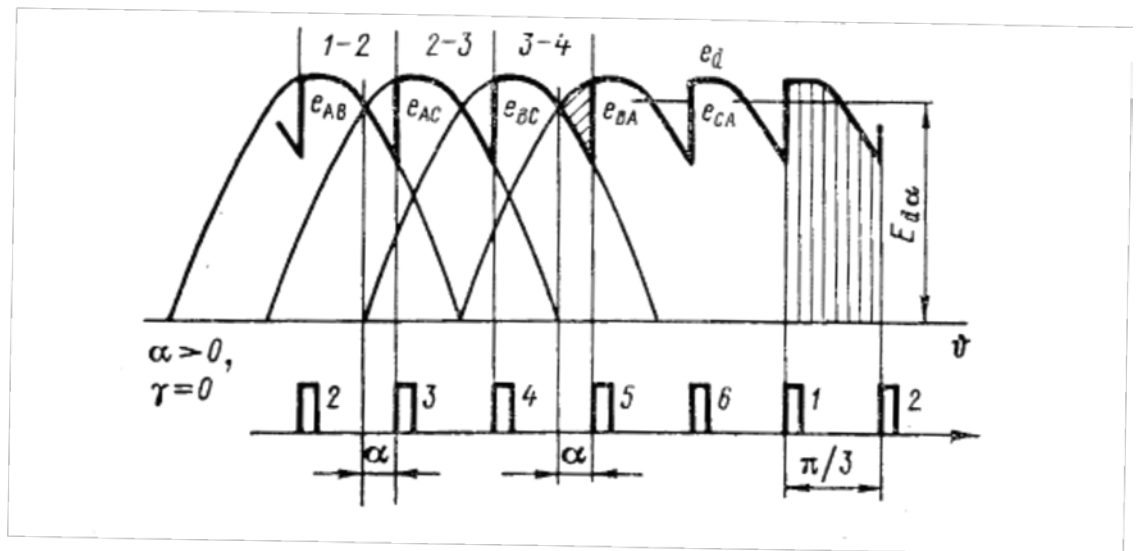


Рисунок 7 – Кривая и постоянная составляющая ЭДС выпрямителя при $\alpha > 0$

Рассмотрим режим, при котором ток нагрузки мал и, следовательно, угол коммутации близок к нулю. Изобразим кривые ЭДС выпрямителя при углах $\alpha = 0$ и $\alpha > 0$ [8, 30]. Постоянная составляющая выпрямленного напряжения уменьшается с ростом угла запаздывания включения (рис. 6, 7). Меняя угол α , можно регулировать напряжение на нагрузке.

Однако углом коммутации пренебрегать нельзя. На рисунке 8 [1, 388] показано выпрямленное напряжение при разных углах γ . Заштрихованная площадка характеризует снижение выпрямленного напряжения из-за увеличения тока нагрузки, который приводит к увеличению угла γ и падению напряжения на индуктивном сопротивлении.

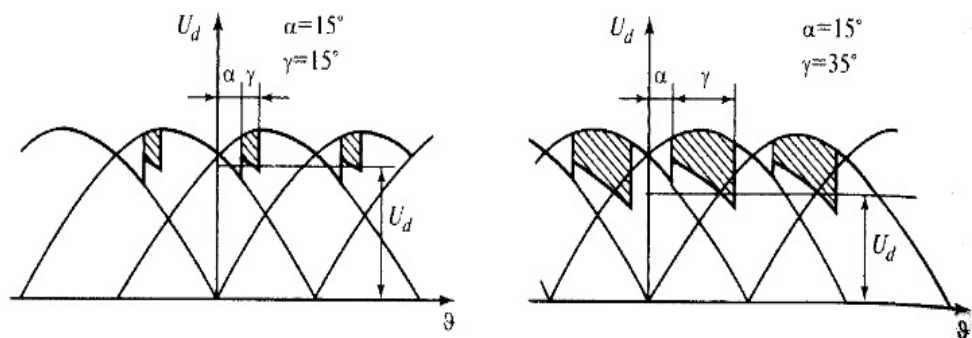


Рисунок 8 – Влияние угла коммутации на значение выпрямленного напряжения

Полученные зависимости можно представить в виде [8, 34]:

$$U_d = E_d \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) \cos \frac{\gamma}{2}.$$

Для режима выпрямления справедливо равенство $\alpha + \gamma/2 \leq \pi/2$. Режим инвертирования характеризуется противоположным знаком приведенного неравенства. На рисунке 9 показано выпрямленное напряжение преобразовательного моста при разных значениях α и γ .

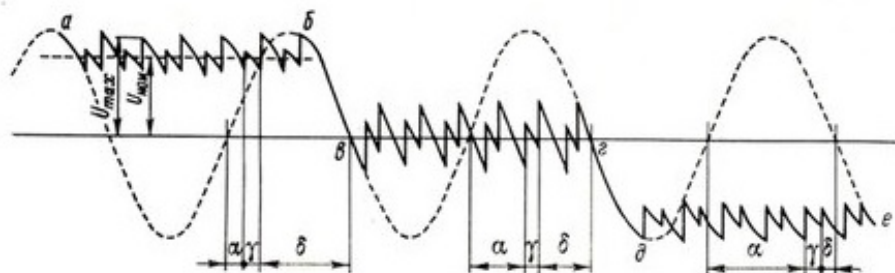


Рисунок 9 – Выпрямленное напряжение преобразовательного моста

Равенство $\alpha + \gamma/2 = \pi/2$ является режимом глубокого регулирования. Для него среднее значение выпрямленного напряжения и мощность, передаваемая через преобразователь, равны 0 [5, 178]. Кроме углов α и γ на рисунке 7 нанесен угол закрытия δ – промежуток времени, при котором напряжение на вентиле отрицательное [1, 403]. Для устойчивой работы инвертора угол δ должен быть достаточен для восстановления управляющих свойств тиристора после того, как его ток снизился до нуля.

Обычно момент открытия тиристорov инвертора характеризуют не углом α , а углом β , который отсчитывается в сторону опережения от точки пересечения фазных ЭДС, сдвинутой относительно принятой оси отсчета времени на электрический угол 180° . Поэтому этот угол называют углом опережения инвертора.

$$\beta = 180^\circ - \alpha$$

$$\beta = \gamma + \delta.$$

Зависимость угла закрытия тиристоров от значения угла β и режимных параметров, то есть от тока нагрузки и ЭДС приемной системы можно представить уравнением:

$$\cos\delta = \cos\beta + \frac{2I_d x_k}{\sqrt{3}E_m}$$

Эти зависимости при $\beta = \text{const}$ приведены на рисунке 10.

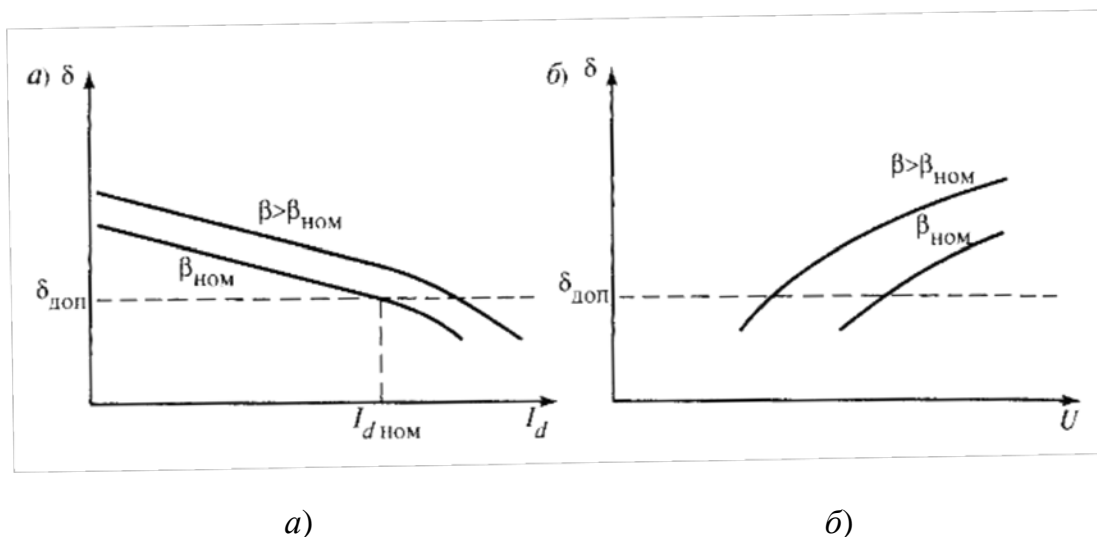


Рисунок 10 – Зависимости угла δ от тока I_d (а) и напряжения энергосистемы U (б)

Из этого рисунка видно, что увеличение тока нагрузки или симметричное снижение напряжения приемной системы приводит к уменьшению угла закрытия тиристоров до недопустимых значений. Причиной этого является увеличение угла коммутации. В некоторых случаях при глубоких снижениях напряжения приемной системы коммутирующий ток двухфазного короткого замыкания может быть настолько мал, что ток заканчивающего свою работу тиристора вообще не снижается до нуля. Он лишь несколько уменьшается, затем возрастает, и тиристор остается в работе, после чего следует опрокидывание инвертора. Для нормальной работы преобразовательного моста в режиме инвертирования угол δ принимается равным 15 – 18 град. эл. [1, 404].

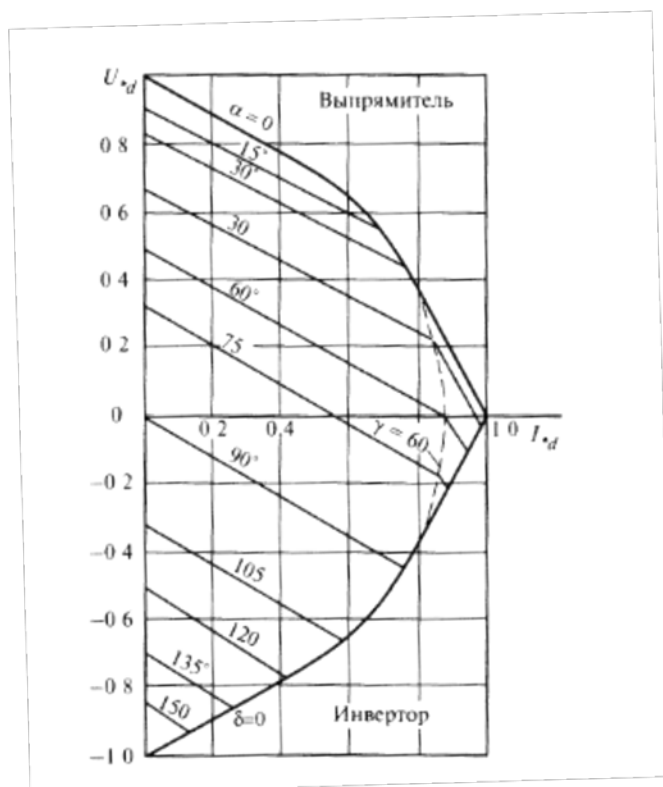


Рисунок 11 – Внешние характеристики выпрямителя и инвертора

Внешние характеристики преобразователя (рисунок 11) показывают, что при изменении угла управления можно плавно перевести преобразователь из режима выпрямления в режим инвертирования и наоборот. Этого же эффекта можно достичь, меняя значение постоянного тока, так как при этом будет меняться значение угла коммутации. При этом меняется полярность выпрямленного напряжения, а направление тока не изменяется, так как тиристоры имеют одно направление [1, 409].

Преобразователи тока имеют недостатки. Рассмотрим мощность преобразовательного моста в его основных режимах работы (рисунок 12) [5, 179]. Преобразователь может как потреблять, так и генерировать активную мощность, но при любых режимах работы он потребляет из сети реактивную мощность.

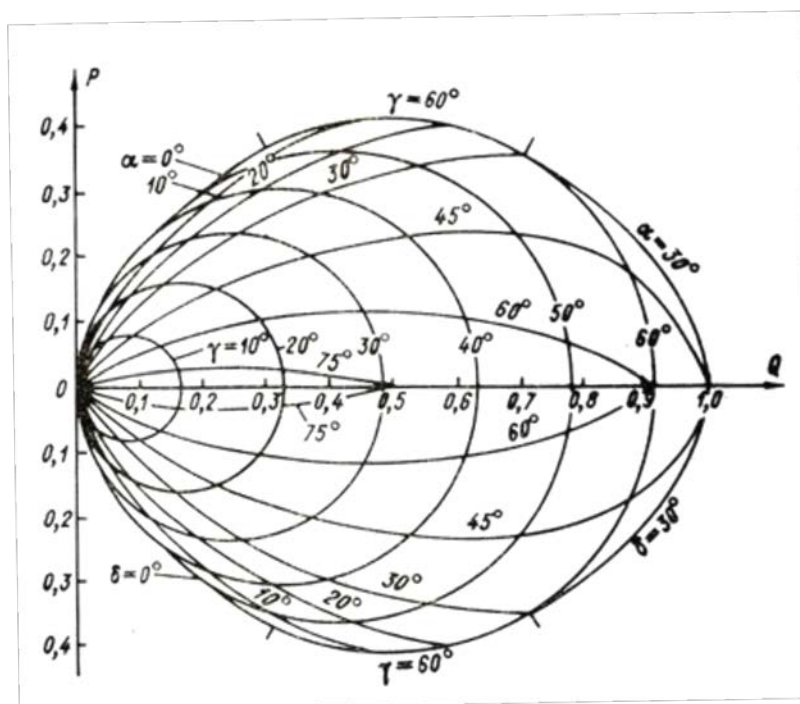
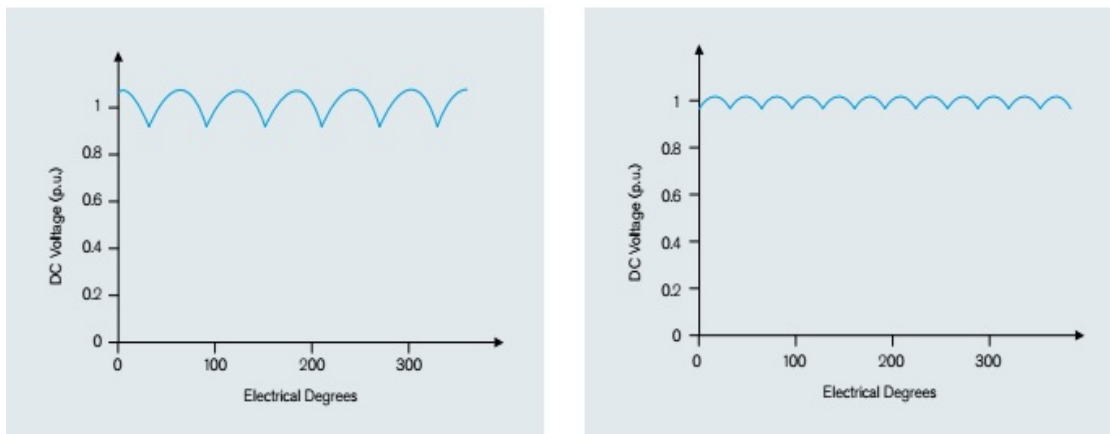


Рисунок 12 – Мощность преобразовательного моста в рабочих режимах

Потребляемая реактивная мощность может привести к дефициту реактивной мощности в передающей и приемной системах [1,454]. Во избежание дефицита на преобразовательных подстанциях предусматриваются мероприятия по компенсации реактивной мощности. Естественно, это отражается на экономических показателях ППТ на базе ПТ, существенно увеличивая их стоимость. Стоимость таких ППТ увеличивается и из-за необходимости компенсации высших гармоник, генерируемых преобразователем в сеть. [1,440].

Для повышения выпрямленного напряжения промежутка полюс-земля линии электропередачи на преобразовательных подстанциях обычно прибегают к применению двухмостовых преобразователей – последовательному соединению отдельных преобразовательных мостов, подключенных к трансформаторам с разными группами соединения обмоток. Это существенно улучшает форму кривой суммарного сетевого тока и уменьшает пульсации в выпрямленном напряжении полюса (рис. 13)

[4, 45]. В конечном итоге существенно снижется установленная мощность фильтрующих устройств [1, 410].



a)

б)

Рисунок 13 – Выпрямленное напряжение одномостовой (*a*)
и двухмостовой (*б*) схем

Анализ работы двухмостового преобразователя проведем на основе схемы замещения, приведенной на рисунке 14. В установившемся режиме вентили будут открываться через промежутки времени, равные 30° . Работа двухмостового преобразователя зависит от коэффициента взаимного влияния мостов, величина которого определяется соотношением [8, 58]:

$$A = \frac{x_c}{x_T + x_c}.$$

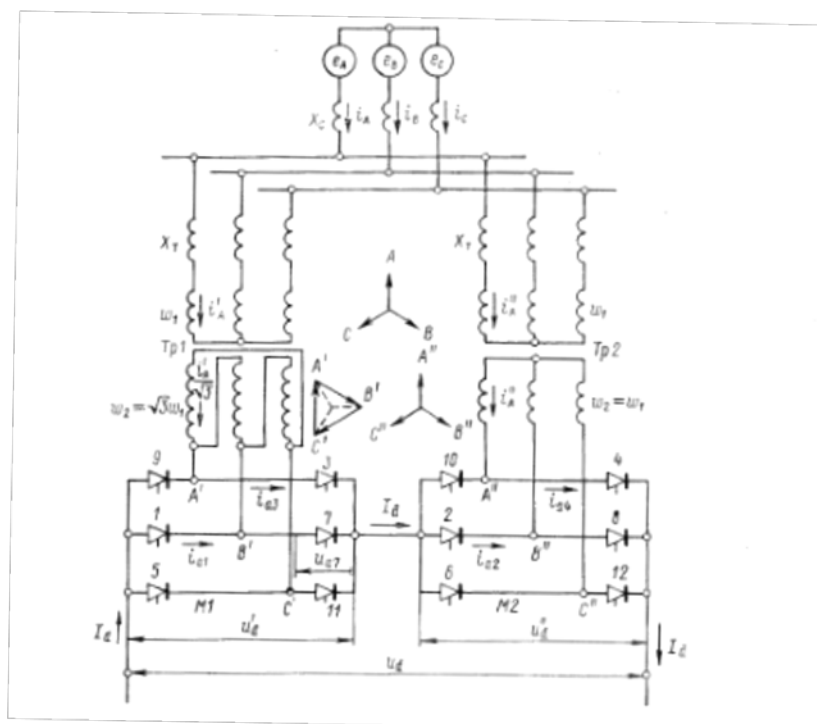


Рисунок 14 – Схема замещения двенадцатипульсового преобразователя

Для системы бесконечной мощности коэффициент A равен нулю. Напряжение на шинах преобразовательной подстанции синусоидально, и взаимное влияние мостов отсутствует. На практике значение этого коэффициента лежит в диапазоне от 0 до 0,5 [1, 411].

В нормальном режиме, если угол коммутации каждого из мостов меньше 30° , вентили работают группами по четыре, когда коммутации отсутствуют, и по пять, когда в одном из мостов начинается коммутация. Коммутации в каждом из мостов идут через каждые 60 град. эл., однако, фазные напряжения мостов сдвинуты на 30 град. эл., поэтому в установившемся режиме вентили двух мостов будут открываться через каждые 30 град. эл. Этот режим носит название режима 4 – 5 [1, 412]. Здесь коммутационный процесс протекает также, как при работе отдельного одномостового преобразователя в режиме 2 – 3. На коммутацию тока в каждом мосте никакого влияния не оказывает работа другого моста. Физически это объясняется тем, что в схеме другого моста в это время протекает постоянный ток [8, 62].

В процессе коммутации на сопротивлении системы возникает ЭДС из-за изменения тока фазы. Эта ЭДС отражается в виде коммутационных выступов и провалов на синусоиде напряжения шин подстанции и соответственно на форме анодных напряжений вентилей, [1, 412]. В режиме инвертора это приводит к уменьшению угла δ [8, 67].

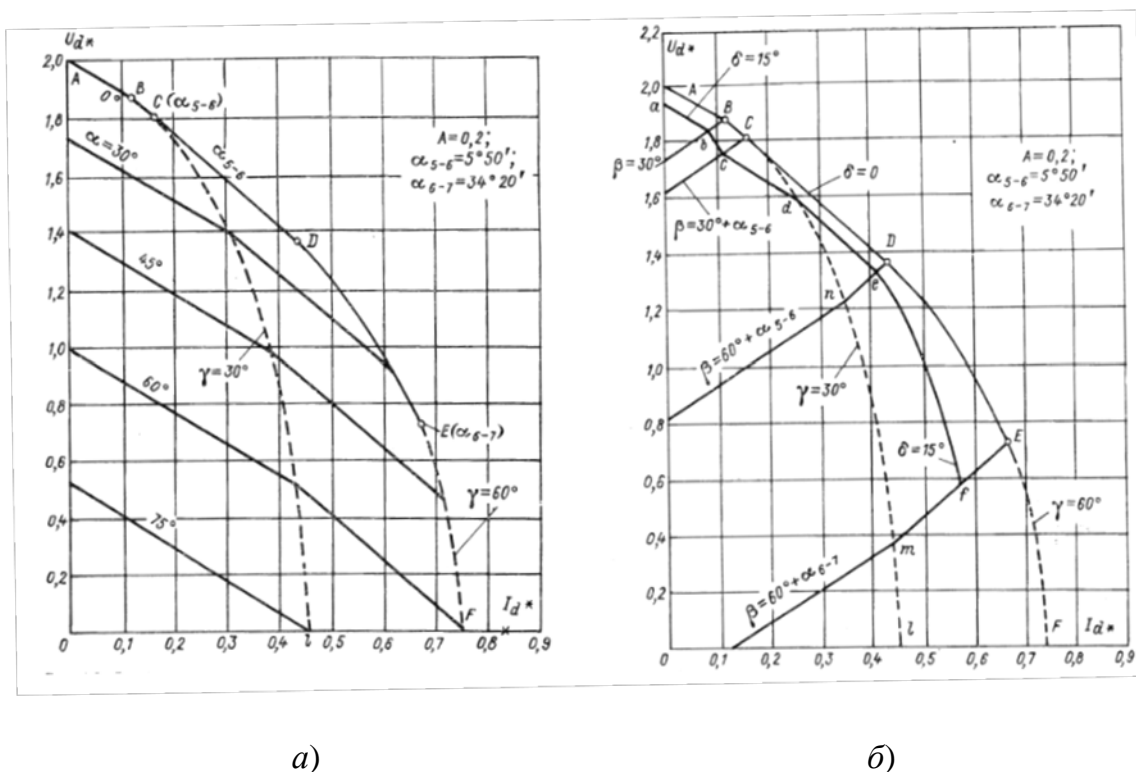


Рисунок 15 – Семейство внешних характеристик двухмостового выпрямителя (а) и инвертора (б)

2.2. Схемы и режимы передач и вставок постоянного тока на базе преобразователей тока

Технологии преобразователей тока, благодаря их способности регулирования мощности, а также преимуществу использования постоянного тока, положили старт в создании ППТ и ВПТ. В нашей стране первая высоковольтная опытно-промышленная ППТ Кашира-Москва включена в

работу в сентябре 1950 года. Мощность передачи 30 МВт, номинальное напряжение 200 кВ [13, 230]. ППТ Кашира-Москва опередила по времени ввода в эксплуатацию известную ППТ на острове Готланд в Швеции. На ППТ Кашира-Москва впервые применено последовательное соединение мостов для повышения напряжения на линии постоянного тока [13, 239].

Опыт эксплуатации ППТ Кашира-Москва сыграл большую роль в сооружении ППТ Волгоград-Донбасс в 1965 году - 720 МВт и 800 кВ. Для ее работы характерен реверсивный режим с изменением направления передаваемой мощности. Только в период паводка на Волге передача энергии производилась круглосуточно в одном направлении. В остальное время энергия передавалась в обратном направлении – от ТЭС Донбассэнерго в энергосистемы Волгоградэнерго и Центра страны [13,241].

В 1978 году напряжение ППТ Cabora Bassa Мозамбик-ЮАР достигает 1066 кВ. Мощность передачи составляет 1920 МВт. Напряжение 1200 кВ появляется в Бразилии на ППТ Itaipu в 1986 году. ППТ имеет мощность 3150 МВт и длину воздушной линии 785 километров [6,2].

Таким образом, ППТ и ВПТ на базе ПТ имеют широкое мировое распространение. Их внедрение связано с возможностью регулирования потоков активной мощности. Однако, применение ПТ является дорогостоящим вследствие необходимости установки фильтров и компенсаторов реактивной мощности.

3. Передачи и вставки постоянного тока на базе преобразователей напряжения

Развитие силовой электроники привело к разработкам полупроводниковых приборов с полностью управляемыми вентилями. Они определили перспективу создания передачи постоянного тока на базе преобразователей напряжения (ПН), использующих IGBT- транзисторы и IGCT-тиристоры.

3.1. Преобразователи напряжения

Рассмотрим особенности ПН, начиная с автономного инвертора напряжения (АИН), который представляет устройство, преобразующее постоянный ток в переменный с неизменной или регулируемой частотой и работающее на автономную нагрузку. Основой автономного инвертора является вентильное переключающее устройство, которое может выполняться по однофазным и трехфазным схемам [9, 438].

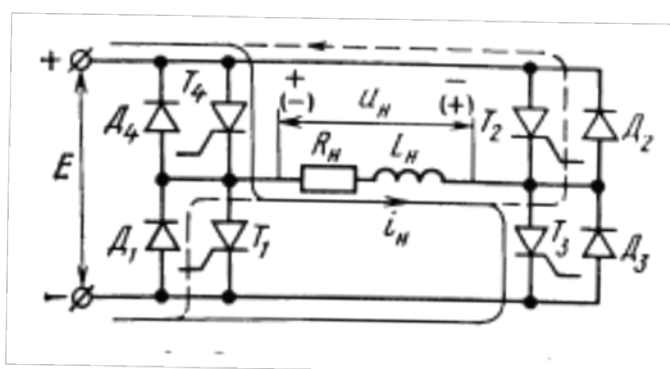


Рисунок 16 – Схема главных цепей однофазного мостового АИН

Нагрузка включается в диагональ моста, образованного тиристорами Т1 – Т4 и обратно включенными диодами Д1 – Д4, предназначенными для пропускания тока активно-индуктивной нагрузки на интервалах времени,

когда ток имеет направление, обратное для тиристоров. Формирование кривой u_H (рисунок 17) требует поочередного отпирания накрест лежащих тиристоров, так что каждый из них открыт в течение $\psi=180^\circ$ [9, 440].

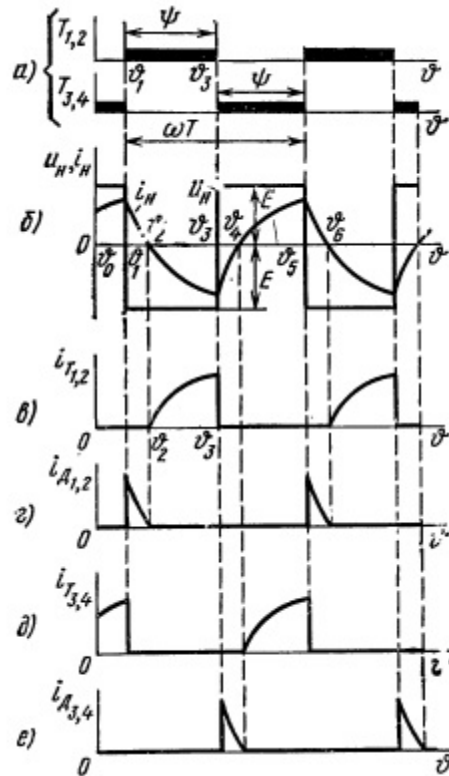


Рисунок 17 – Временные диаграммы однофазного АИН

На интервале $\vartheta_0 - \vartheta_1$ проводят ток тиристоры Т3, Т4. Напряжение на нагрузке равно E и имеет положительную полярность. В момент времени ϑ_1 тиристоры Т3 и Т4 запираются, а Т1 и Т2 отпираются. За счет индуктивности в цепи нагрузки ток под действием ЭДС самоиндукции сохраняет на интервале $\vartheta_1 - \vartheta_2$ прежнее направление. Ток нагрузки на этом интервале проводят диоды Д1 и Д2. Отпирание диодов вызывает изменение полярности выходного напряжения на нагрузке [9, 441].

Напряжение на нагрузке содержит гармоники: 3-я гармоника составляет 33,3%, 5-я – 20%, 7-я – 14,3%. Для выделения на нагрузке первой гармоники выходное напряжение инвертора подвергают фильтрации путем установки между инвертором и нагрузкой фильтров. При рассмотренной

форме кривой выходного напряжения регулирование его величины возможно лишь путем изменения напряжения E [9, 442].

Выходное напряжение инвертора с уменьшенным содержанием гармоник достигается применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ), при которой кривая выходного напряжения формируется в виде набора импульсов с промодулированной шириной, обеспечивающей синусоидальное изменение во времени первой гармоники (рисунок 18 а). При этом будет минимальное содержание высших гармоник с близкими к основной гармонике частотами. Гармоники с более высокими частотами могут быть легко отфильтрованы.

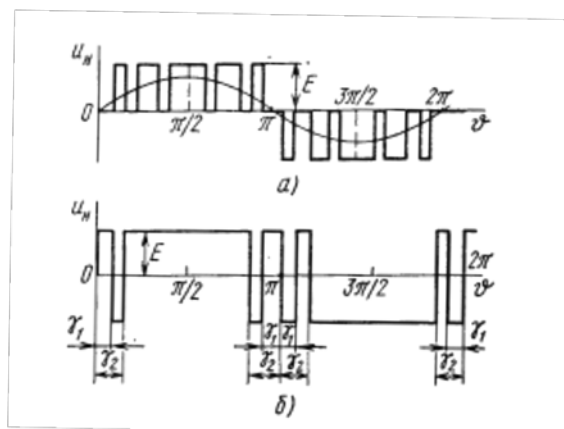


Рисунок 18– Кривые выходного напряжения АИН при однополярной (а) и двухполярной (б) ШИМ

Кривая выходного напряжения на рисунке 18 а характеризует однополярную ШИМ, так как выходные импульсы в течение полупериода имеют одинаковую полярность. Применяется также двухполярная ШИМ, при которой вместо пауз в кривой выходного напряжения на рисунке 18 б содержатся импульсы противоположной полярности. Регулирование выходного напряжения можно производить либо по цепи питания, либо с помощью самого инвертора путем изменения фазового сдвига сигналов управления одной пары тиристоров полумоста относительно сигналов управления другой пары при переключении тиристоров в каждом полумосте с указанными значениями углов γ [9, 446].

В трехфазном АИН (рис. 19) каждый тиристор проводит ток в течение $\psi=180$ град.эл. Последовательность включения тиристоров соответствует порядку их номеров при фазовом сдвиге в 60 град. эл. Тиристоры одной фазы не могут быть открыты одновременно. В любой момент времени одновременно проводят ток три тиристора, два из которых относятся к какой-либо одной группе, а один – к другой [9, 447].

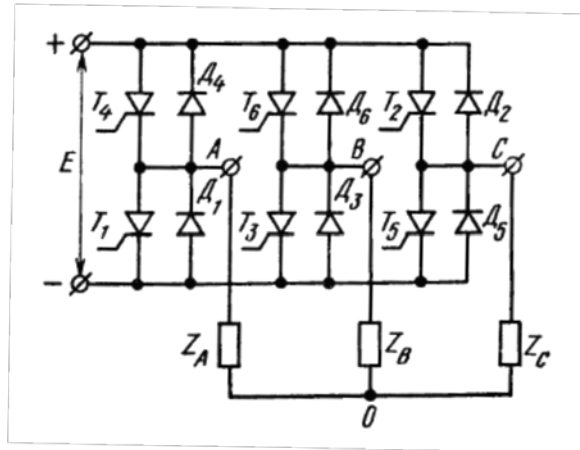


Рисунок 19 – Схема главных цепей трехфазного мостового АИН

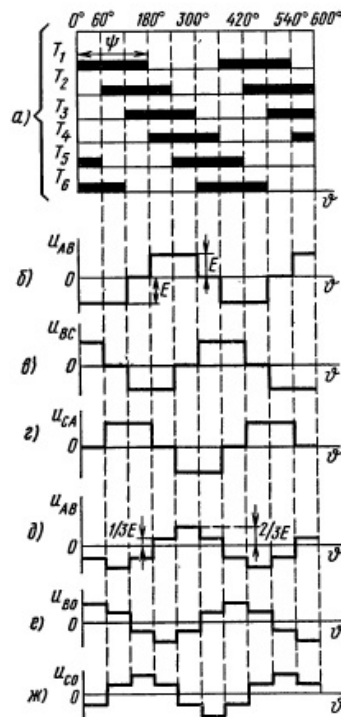


Рисунок 20 – Временные диаграммы, иллюстрирующие принцип формирования кривой выходного напряжения трехфазного мостового АИН при $\psi=180$ град.эл.

Кривая линейного напряжения состоит из импульсов с амплитудой E чередующейся полярности длительностью в 120 град. эл., разделенных паузой в 60 град. эл. Импульсы напряжения с амплитудой E положительной или отрицательной полярности создаются при проводимости накрест лежащих тиристоров двух фаз, определяющих рассматриваемое линейное напряжение. Фазные напряжения имеют вид ступенчатой кривой со значениями напряжения $1/3 E$ и $2/3 E$. Это связано с тем, что в любой момент времени ток одновременно проводят три тиристора инвертора, подключающие нагрузки в фазах на напряжение источника таким образом, что две из них включаются параллельно между собой и последовательно с третьей. В кривой выходного напряжения отсутствуют гармоники, кратные трем. Низшими гармониками являются 5-я и 7-я. Регулирование выходного напряжения инвертора при рассмотренной форме кривой производят по цепи питания, например, применением на входе инвертора управляемого выпрямителя или импульсного преобразователя постоянного напряжения [9, 448].

Преобразователи напряжения, имеющие такую же схему и принципы управления, как и АИН, работают на сеть, в которой есть источники напряжения. Необходимыми элементами схемы ПН являются конденсатор на зажимах постоянного тока и реактор на стороне переменного тока. Постоянное напряжение измеряется и сравнивается с уставкой. По результатам этого измерения сигнал ошибки передается в регулятор широтно-импульсной модуляции. Когда постоянный ток имеет положительное направление, ПН работает в выпрямительном режиме и конденсатор разряжается на нагрузку, система управления изменяет угол α и преобразователь потребляет мощность из системы переменного тока. При отрицательном направлении постоянного тока ПН работает в инверторном режиме, конденсатор заряжается от источника постоянного напряжения и

система управления изменяет угол α вентиляей так, что преобразователь выдает мощность в систему постоянного тока [6, 27].

Реактор на стороне переменного тока предназначен для: ограничения скачкообразного нарастания тока; ограничения тока короткого замыкания; предотвращения резонанса на стороне постоянного тока (100 или 150Гц); фильтрации гармоник и сглаживания постоянного тока [3, 7].

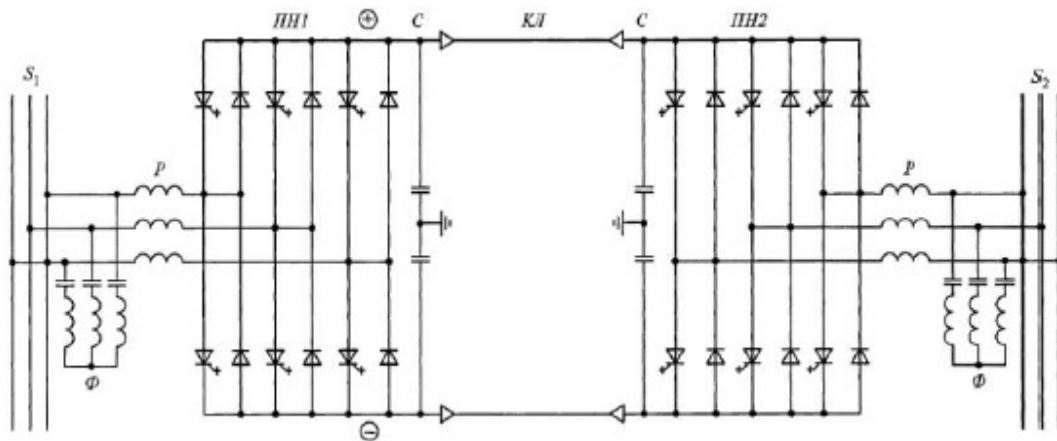


Рисунок 22 – Схема ППТ на базе преобразователей напряжения

Рассмотрим схему преобразователя напряжения, работающего в сети (рис. 21). С помощью использования широтно-импульсной модуляции можно менять угол сдвига δ между напряжением преобразователя U_c и напряжениям сети U_{ac} или изменять амплитуду напряжения U_c (в определенных пределах) [10, 2].

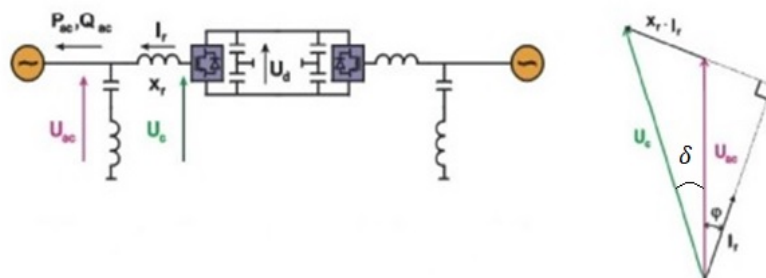


Рисунок 21 – Схема сети и векторная диаграмма ПН

Из векторной диаграммы видно, что ПН может работать в любом из четырех квадрантов плоскости P , что показано на рисунке 22. Как видно из рисунка, преобразователь напряжения может генерировать или потреблять реактивную мощность в широком диапазоне за счет управления вентилями IGBT, что играет большую роль в стабилизации переменного напряжения [11, 46].

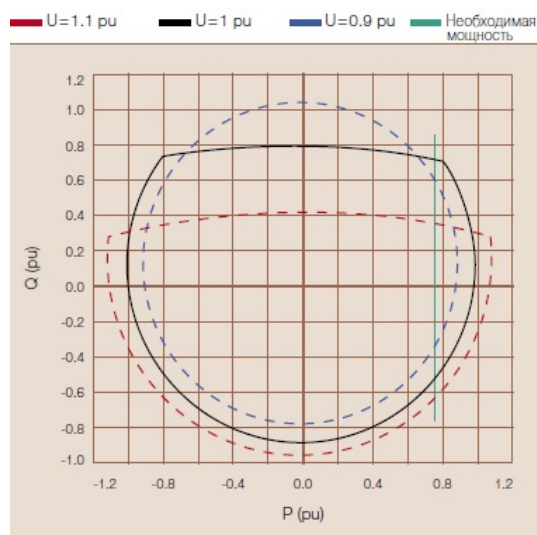


Рисунок 22 – Мощность ПН в его основных режимах работы

Однако, ПН имеет ограничения по постоянному току передачи, току вентилям ПН и напряжению, генерируемому ПН, которые влияют на режимы работы ППТ. Так как постоянный ток не зависит от реактивных токов преобразователей, то имеются ограничения по прямому и реверсивному потоку активной мощности. В отличие от постоянного тока, ток плеча зависит и от реактивной составляющей полного тока. Это ограничение имеет форму окружности с центром в начале координат. Выдача или потребление реактивной мощности ПН зависит только от напряжения преобразователя напряжения [12, 148].

В НИИПТ разработана и исследована схема двенадцатипульсного ПН с шунтовыми конденсаторами (ШК), рекомендуемая для ППТ и ВПТ (рис.23). В таких преобразователях ШК эффективно ограничивают перенапряжения, возникающие из-за быстрых принудительных коммутаций тока. ШК

отфильтровывают и высшие гармоники тока. Коэффициент искажения синусоидальности сетевого тока у этого преобразователя в 2 – 3 раза меньше, чем у традиционного двенадцатипульсного преобразователя [13, 225].

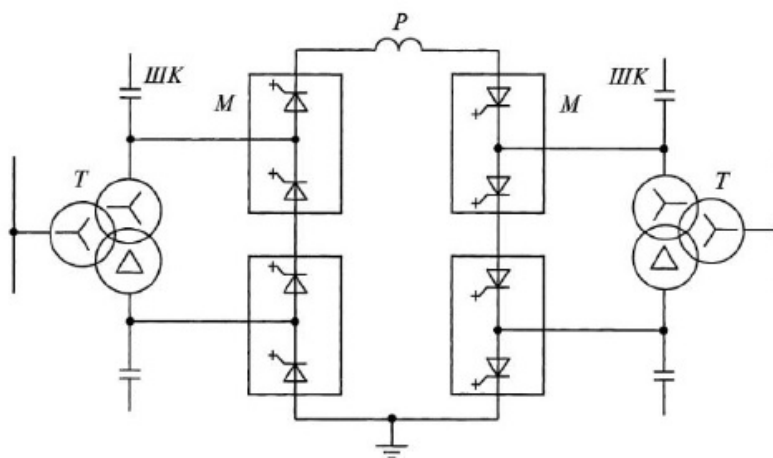


Рисунок 23– Двухмостовая схема ВП на преобразователя напряжения

ПН может применяться для компенсации реактивной мощности. Это режим статического компенсатора (Статком). Статком создает ЭДС, которая больше или меньше напряжения сети. Если эта ЭДС больше напряжения сети, Статком генерирует реактивную мощность в сеть, если ЭДС меньше напряжения сети, он потребляет реактивную мощность [1, 307].

3.2. Схемы и режимы передач и вставок постоянного тока на базе преобразователей напряжения

Технология ППТ и ВПТ, использующих ПН, получила широкое развитие за рубежом (таблица 1) [13, 228]. Фирмой АВВ эта технология названа HVDC Light – «легкие передачи постоянного тока» [13, 225]. В России для нормализации работы энергосистем Сибири и Востока на базе ПН введена ВПТ мощностью 200 МВт и напряжением 220 кВ на подстанции Могоча .

Таблица 1 – Действующие объекты преобразователей HVDC Light

| Название проекта | Страна и год ввода | Мощность | Напряжение преобразователя, кВ | Длина линии (кабель), км | Причина применения |
|-------------------|--------------------|-----------|--------------------------------|--------------------------|---|
| Hellsjon | Швеция 1997 | 3 МВт | ±10 | 10*0,2 | Объединение сетей переменного тока |
| Hagfors | Швеция 1999 | 22 Мвар | ±10 | – | Подавление фликкер-фактора |
| Gotland | Швеция 1999 | 50 МВт | ±80 | 70 | Качество электроэнергии в сети с ветровыми генераторами |
| Tjaereborg | Дания 2000 | 7 МВт | ±9 | 4 | Качество электроэнергии в сети с ветровыми генераторами |
| Directlink | Австралия 2000 | 180 МВт | ±80 | 65 | Объединение несинхронных сетей переменного тока |
| Moselstahl Werke | Германия 2000 | 0-38 Мвар | ±18,3 | – | Подавление фликкер-фактора |
| Eagle Pass | США 2000 | 36 МВт | ±15,9 | – | ВПТ, повышающая устойчивость объединяемых сетей |
| Cross Sound Cable | США 2000 | 330 МВт | ±150 | 40 | Объединение синхронных систем, подводный кабель |
| Murray Link | Австралия 2002 | 200 МВт | ±150 | 180 | Качество электроэнергии, управляемость |
| Trolla | Норвегия 2005 | 20*41 МВт | ±60 | 67 | Платформа |
| Estlink | Эстония 2006 | 350 МВт | ±150 | 105 | Обмен мощности Финляндия-Эстония |

Кроме того, ВПТ на базе ПН широко применяются при подключении к сети ветрогенераторов; устройств малой генерации автономных сетей, таких как поселки или буровые платформы, острова; подключения к сети с низким отношением мощности короткого замыкания к мощности передачи; при использовании подводного или подземного кабеля. В металлургической отрасли ПН применяются в режиме Статком для стабилизации напряжения в сети и подавления фликкера.

4. Особые режимы передач и вставок постоянного тока в энергосистеме

Рассмотрев работу ПТ и ПН, можно сделать вывод, что ПН являются более эффективными. Возможность ПН работать во всех четырех квадрантах мощности позволяет стабилизировать величину напряжения систем за счет регулирования реактивной мощности линии, что позволяет достичь высокое качество электроэнергии в энергосистеме.

Для работы ПТ требуются устройства компенсации реактивной мощности, так как ПТ способны регулировать лишь активную мощность, что делает ППТ на базе ПТ менее экономичными. Также на стоимость электропередачи с ПТ влияет установка фильтров для снижения генерируемых в сеть гармоник.

Благодаря ШИМ частота создаваемых ПН гармоник тока и напряжения во много раз превосходит частоты гармоник, генерируемых ПТ, следовательно, для компенсации гармонических составляющих необходимы фильтры меньших размеров и меньшей стоимостью. Кроме того, особые свойства ВПТ и ППТ на базе ПН создают и новые области их применения. Рассмотрим только некоторые из них.

4.1. «Гибридные» линии

В настоящее время в электросетевых компаниях эксплуатируются перегруженные линии. Это связано с увеличением потребления электроэнергии и ведет к снижению качества электроэнергии. Следует отметить, что недопустимые отклонения показателей качества электроэнергии могут привести:

- к перегреву обмоток электрооборудования, сокращению срока службы изоляции электрических машин и аппаратов, пробоем изоляции и выходу оборудования из строя;
- к ухудшению работы устройств автоматики, телемеханики и связи, и, как следствие, отказам срабатывания электрооборудования;
- к выпадению синхронных электродвигателей из синхронизма;
- к увеличению скольжения у асинхронных электродвигателей, вплоть до их остановки;
- к появлению дополнительных потерь в электрических машинах, трансформаторах и в батареях конденсаторов, и, следовательно, к повышенному расходу электроэнергии, снижению производительности технологического оборудования, расстройству технологического процесса [15].

Так появилась информация о том, что в филиале ОАО «МРСК Сибири» – «Красноярскэнерго» есть объект, проблемный с точки зрения качества электроэнергии. Напряжение на приемном конце электропередачи составляет 5,04 кВ, а $\Delta U = 22\%$, что недопустимо. Значение напряжения у потребителей этого объекта, особенно в зимний период, вот уже на протяжении 5 лет не превышает 160 – 170 В, что не соответствует ГОСТ Р 54149 на качество электроэнергии. Решение этой проблемы может быть реализовано

применением средств регулирования напряжения и перетоков активной и реактивной мощностей на базе ПН [16].

В частности, решению проблемы некачественного электроснабжения потребителей могут служить «Гибридные» линии, которые позволяют улучшить устойчивость, надежность и повысить пропускную способность линий переменного напряжения путем ввода в электрические сети линий и вставок постоянного тока.

Для повышения качества электроэнергии объекта филиала ОАО «МРСК Сибири» – «Красноярскэнерго», предлагается инновационное решение проблемы: реконструировать существующую воздушную линию напряжением 6 кВ переменного тока в линию постоянного тока напряжением $\pm 7,5$ (15) кВ без коренной реконструкции существующей линии. Из четырех теоретически возможных вариантов был выбран вариант биполярной трехпроводной линии, изображенной на рисунке 24.

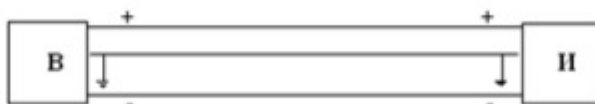


Рисунок 24 – Структурная схема линии постоянного тока

В данном случае, один из проводов (верхний) заземляется и также используется в качестве грозозащитного троса. Два других провода используются как прямой (+) и обратный (-) полюса передачи. Преимущества такой схемы: отсутствие необходимости изменения конструкции линии и увеличение ее пропускной способности в 2 раза с одновременным уменьшением потерь мощности и напряжения. В связи с масштабным развитием силовой преобразовательной техники, стоимость преобразователей значительно снизилась, что делает передачи постоянного и переменного тока конкурентоспособными, а решение рассматриваемой проблемы более экономичной. Приблизительная стоимость ППТ

напряжением 15 кВ составляет около 70 млн. руб., что в разы меньше варианта строительства новой подстанции [16].

Загруженность до предела энергосетей является актуальной проблемой во всех странах мира. Так, например, энергетика Германии переживает нелегкие времена. Для транспортировки на юг страны той электроэнергии, что во все больших количествах вырабатывается «оффшорными» ветросиловыми установками в Северном и Балтийском морях, мощностей существующих сегодня линий электропередачи уже не хватает. Инженеры компании «Amprion», которая владеет самой обширной в Германии сетью высоковольтных линий электропередачи общей протяжённостью в 11 тысяч километров, решили также переоборудовать существующие высоковольтные линии, то есть сделать их «Гибридными», что позволит чуть ли не вдвое увеличить мощность существующих ЛЭП при минимальных затратах [17].

Таким образом, постоянный ток может внедряться за счет реконструкции некоторых из существующих электропередач переменного тока. Это является экономически обоснованным решением, так как отсутствует необходимость в расширении линий электропередач переменного тока. Такое внедрение приводит и к увеличению возможностей передачи мощности потребителям и, как следствие, увеличению качества электроэнергии.

4.2. Подключение возобновляемых источников энергии к энергосистеме

Спрос на электроэнергию непрерывно растет. В ряде случаев эффективным является применение возобновляемых источников энергии. Среди них ветер способен производить основной объем энергии. Однако

ветряные электростанции могут приводить к дисбалансу частоты и мощности в сети. Так как ветряные электростанции требуют большого пространства, то поиск места для их размещения на суше, становится непростой задачей из-за роста населения и общих потребностей цивилизации. Это вынуждает использовать ветряные электростанции, располагаемые в открытом море. Возникает проблема доставки электроэнергии на берег, и затем к электрическим компаниям. Мощность ветряных электростанций обычно от 400 МВт до 1200 МВт, и они размещаются на расстоянии от 50 до 400 км от берега.

Справиться с этой задачей помогают технологии HVDC Light. Пример работающей технологии можно увидеть на мысе Нэс острова Готланд (Шведский остров в середине Балтийского моря). В этой части острова Готланд постоянно проживает небольшое число людей, и в течение многих веков Нэс был, в основном, пристанищем рыбаков и фермеров. В 1984 году на мысе Нэс началось строительство одного из крупнейших парков ветроэнергетических установок в Швеции. Строительство ведется до сих пор. Предполагается установка агрегатов общей мощностью 50 МВт, при этом пиковая нагрузка от местных потребителей составляет всего 17 МВт. Проблема заключалась в том, что инфраструктура, построенная в расчете на нынешний уровень потребления, оказалась непригодной для передачи возросшей вырабатываемой мощности. Поэтому было принято решение нарастить сеть, чтобы она была способна передавать излишки энергии в периоды малой нагрузки. Решено использовать технологию передачи на постоянном токе HVDC Light. При этом были удовлетворены требования как к передаваемой мощности, так и к качеству электроэнергии. Прокладка кабеля велась вдоль имеющихся воздушных линий, тем самым ущерб ландшафта был сведен к минимуму [18, 26].

Ветроэнергетика является важной частью энергосистем многих стран. Лидирует в этой области Германия. Здесь удачно использованы особенности

климата на севере страны, где ветры дуют практически постоянно. Второе место занимает Испания, третье – США. Маленькая, но ветреная Дания уже к 2030 г. планирует получать половину всей необходимой электроэнергии с помощью ветра [19, 121].

Таким образом, с развитием технологий HVDC Light ветроэнергетика сможет подняться на более высокий уровень и генерировать в сети большие мощности, что позволит энергосистемам разных стран ограничить потребление исчерпаемых запасов ресурсов и создать экологически чистую обстановку.

Заключение

С каждым днем потребление электроэнергии увеличивается. Пропускная способность линий передач переменного тока является ограниченной. В результате линии низких классов напряжения являются перегруженными, что приводит к увеличению потерь электроэнергии и, как следствие, к снижению качества электроэнергии. Но в то же время многие линии являются недогруженными. Рассмотренные в реферате свойства ППТ и ВПТ высоких и ультравысоких напряжений позволяют справиться с этими проблемами и определяют значимую роль этих передач в передачах электроэнергетики.

Увеличивающийся рост нагрузки требует управления режимами линий электропередач для оптимального распределения мощностей между энергосистемами. С этими задачами сегодня успешно справляются устройства на базе преобразователей тока и напряжения, которые позволяют сделать передачи управляемыми, адаптивными к режимам связываемых энергосистем. Показано, что лучше всего сегодня эти задачи решаются с помощью устройств на базе ПН.

Применение технологии постоянного тока при реконструкции сетей и создании сечений с «гибридными» электропередачами, применение ПН в схемах выдачи мощности ветроэлектростанций и другие применения этих устройств позволяют существенно снизить и экологическую нагрузку электроэнергетики.

Библиографический список

1. **Ю.П. Рыжов** Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов – М: Издательский дом МЭИ, 2007.
2. Газета «Донэнерго» № 15 ноябрь 2013. «Крупнейшие отключения электричества в мире».
3. **И.Э. Терентьев, Р.А. Уфа.** Анализ технологий высоковольтной передачи энергии постоянным током
<http://www.scienceforum.ru/2015/pdf/11051.pdf>
4. **С. Barker** HVDC for beginners and beyond
http://www.cigre.ru/research_commitets/ik_rus/b4_rus/library/ALSTOM_HVDC_for_Beginners_and_Beyond.pdf
5. **Н.Н. Тиходеев.** Передача электрической энергии / Под ред. В.И. Попкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л: Энергоатомиздат. 1984.
6. **Виджей К.** Суд. HVDC and FACTS Controllers: применение статических преобразователей в энергетических системах: Пер. с англ.: НП «Научно-инженерное информационное агентство», 2009.
7. **Н.В. Чернобровов.** Релейная защита. Учебное пособие для техникумов. Изд. 5-е, перераб. и доп. М., «Энергия, 1974.
8. **А.В. Поссе.** Схемы и режимы электропередач постоянного тока. Издательство «Энергия», 1973.
9. **Ю.С. Забродин.** Промышленная электроника: Учебник для вузов. Второе издание, стереотипное. – М.: ООО ИД «Альянс», 2008.
10. **К. Eriksson, С. Liljegren, К. Sobrink.** HVDC Light Experiences applicable for power transmission from offshore wind power parks.
http://cleps.se/upload/HVDC_Light_Experiences.pdf
11. **Л. Карлсон.** Высоковольтные линии постоянного тока
[http://www02.abb.com/global/ruabb/ruabb056.nsf/99ad595c32e0c2d9c12566e1000a4540/82af8ff8ca27a61ec12570ca0045c63f/\\$FILE/p42-46.pdf](http://www02.abb.com/global/ruabb/ruabb056.nsf/99ad595c32e0c2d9c12566e1000a4540/82af8ff8ca27a61ec12570ca0045c63f/$FILE/p42-46.pdf)

12. **М.Е. Гольдштейн, Н.В. Корбуков.** Допустимые длительные режимы постоянного тока на базе преобразователя напряжения. Электроэнергетика глазами молодежи. Научные труды IV международной научно-технической конференции. Новочеркасск 2013.
13. **А.Ф. Дьяков.** Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. НТФ «Энергопрогресс» корпорации «ЕЭЭК». Москва, 2012.
14. **М.И. Мазуров, А.В. Николаев** Передача постоянного тока на преобразователях напряжения как элемент управления качеством электроэнергии. **Н.А. Манов** Управление электроэнергетическими системами – новые технологии и рынок. – Сыктывкар, 2004.
15. **В.Ю. Чуйков** Оценка качества электрической энергии и его влияния на работу и долговечность электромеханического оборудования <http://www.ivpromenergo.ru/page/columns.php?pdate=d20141406t133500>
16. **С. П. Федорова** Повышение качества электроснабжения удаленных потребителей путем создания технологии системы распределения электроэнергии с применением гибридных линий http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s13/s13_016.pdf
17. <http://wiki.ru/sites/energetika/id-articles-444607.html>
18. **Г. Беннстам, Л. Карлсон** HVDC Light. Удобная и экологичная технология. https://library.e.abb.com/public/b716f6ace969c3fac1256fb9002b2365/p25_29.pdf
19. **Ю.Д. Сибикин** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. – М.: КНОРУС, 2010.