

Влияние преобразователей напряжения на процессы в прилегающих сетях переменного тока

А.С. Зеленин, О.В. Сулова, Е.Б. Шескин
ОАО «НТЦ ЕЭС»
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация — на сегодняшний день большинство исследований, касающихся работы вставок постоянного тока и других устройств на основе преобразователей напряжения, были сосредоточены либо на процессах, происходящих на стороне постоянного тока, либо на влиянии преобразователей напряжения на устойчивость и надежность электрических сетей. В частности, не была выполнена оценка влияния управляемых устройств на процессы, происходящие при коротких замыканиях в прилегающих сетях переменного тока. В настоящей работе показано, что в определенных условиях, управляемые устройства, выполненные на основе преобразователей напряжения, оказывают существенное влияние на величину токов, протекающих в элементах прилегающих сетей переменного тока, в частности, при несимметричных коротких замыканиях и однофазных автоматических повторных включениях примыкающих к таким объектам воздушных линий.

Ключевые слова — преобразователь напряжения, вставка постоянного тока, ток короткого замыкания, ток подпитки, однофазное автоматическое повторное включение

The effect of voltage source converters on the processes in adjacent AC grids

O.V. Suslova, A.S. Zelenin, E.B. Sheskin
JSC “Scientific and Technical Center of Unified Power System”
Saint-Petersburg, Russia

Abstract — to the moment most of the researches conducted in the area of HVDC links and other VSC-based devices were focused on the DC voltage side or on the effect of VSC on the stability and reliability of power grids. In particular there was no estimation made of VSC-based devices impact on the processes which take place during faults in the adjacent AC grids. It is shown that under specific conditions VSC-based devices substantially effect on the currents, flowing in the elements of adjacent AC grids, particularly, during asymmetrical faults and single-phase automatic reclose cycles of adjacent transmission lines.

Keywords — voltage source converter, high voltage direct current link, HVDC, fault current, contribution to fault, single-phase automatic reclose

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1997 году в Швеции была введена в эксплуатацию первая демонстрационная передача постоянного тока на преобразователях напряжения (ППТН) мощностью 3 МВт. С тех пор число ППТН, внедренных в энергосистемы различных стран, составило более двадцати, обозначились тенденции развития этих объектов: увеличение мощности от десятков МВт (в начале 2000-х) до 1000 МВт (на сегодняшний день), уровней напряжения постоянного тока от 10 кВ (в начале 2000-х) до 320 кВ (на сегодняшний день). Преобразователи напряжения характеризуются независимым управлением активной и реактивной мощностью, способностью выдавать реактивную мощность, поддерживать напряжение на стороне

переменного тока, возможностью энергоснабжения слабых энергосистем и пассивных нагрузок, уменьшенным размером фильтров высших гармоник на стороне переменного тока.

В ЕЭС России в настоящее время функционирует одна вставка постоянного тока на преобразователях напряжения (ВПТН) на ПС 220 кВ Могоча. Развитием проекта ВПТН на ПС 220 кВ Могоча является создание ВПТН на северном транзите между энергосистемами Сибири и Дальнего Востока в районе ПС 220 кВ Хани. В перспективе возможны применения объектов постоянного тока на основе ПН для создания управляемых разрывов в энергосистемах мегаполисов с целью уменьшения токов короткого замыкания, для присоединения к ЕЭС изолированных энергосистем островных территорий и др.

Одной из наиболее важных проблем при разработке и внедрении объектов постоянного тока на ПН является подготовка релейной защиты и средств противоаварийной автоматики для нормального совместного функционирования объектов постоянного тока и примыкающей системы переменного тока. Авторы предлагают рассмотреть влияние объектов постоянного тока на процессы при автоматических повторных включениях (АПВ) примыкающих линий.

Автоматическое повторное включение (АПВ) воздушных линий (ВЛ) электропередачи – это эффективное мероприятие для повышения надежности электроснабжения потребителей. Для повышения надежности электроснабжения при однофазных коротких замыканиях также применяют однофазное автоматическое повторное включение (ОАПВ).

В цикле ОАПВ после двустороннего отключения от сети аварийной фазы ВЛ в месте короткого замыкания может продолжать гореть электрическая дуга, которая получает подпитку от неотключенных фаз линии через междуфазные емкости ВЛ. Повторное включение должно быть осуществлено после погасания дуги, так как в противном случае ОАПВ будет unsuccessful и потребует полного трехфазного отключения ВЛ. Поэтому важной задачей, возникающей при применении ОАПВ, является корректное определение величины тока подпитки, оценка влияния его величины на возможность гашения дуги в бестоковую паузу – интервал времени, в течение которого аварийная фаза ВЛ отделена от сети выключателями начала и конца линии.

Наибольшая вероятность успешного ОАПВ достигается:

- при малых токах подпитки;
- при отсутствии повторных пробоев в месте короткого замыкания после гашения дуги, что зависит от уровня восстанавливающегося напряжения.

II. Величина тока подпитки дуги

Величина тока подпитки носит статистический характер, обусловленный наличием ряда случайных факторов. В общем случае она зависит от:

- фазы линии, на которой произошло короткое замыкание;
- угла между напряжениями по концам линии (который в свою очередь определяется значением передаваемой мощности);
- расположения места повреждения на линии;
- числа шунтирующих реакторов, установленных по концам линии;
- уровня рабочего напряжения;
- длины дугового промежутка;
- погодных условий.

Величина апериодической составляющей тока подпитки оказывает влияние на возможность успешного гашения дуги, возникающей в месте короткого замыкания.

Суммарный ток подпитки в месте повреждения во многом определяется электростатической (емкостной) составляющей тока. Электростатическая составляющая тока обусловлена наличием на неповрежденных фазах ВЛ рабочего напряжения сети.

На рис. 1 показана емкостная схема замещения ВЛ, которая справедлива в момент бестоковой паузы ОАПВ [1]. Для многократно транспонированной линии указанные проводимости не зависят от фазы ВЛ (А, В, С).

Пользуясь емкостной схемой замещения ВЛ, в предположении, что напряжения в начале и в конце линии одинаковые по величине и углу, можно записать:

$$I_{\Sigma C} = (\dot{U}_B - \dot{U}_A) \cdot (jB_M) + (\dot{U}_C - \dot{U}_A) \cdot (jB_M) \quad (1)$$

где $B_M = B_M^* l_{ВЛ}$ – междуфазная проводимость ВЛ, $l_{ВЛ}$ – длина ВЛ (км), $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

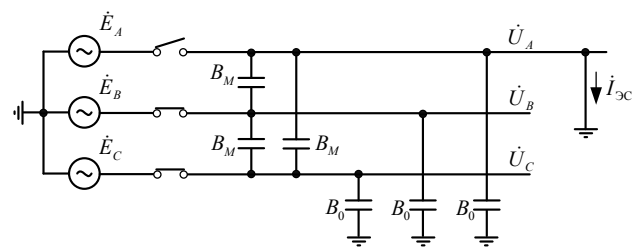


Рис. 1 - Емкостная схема замещения ВЛ в паузу ОАПВ

B_M – междуфазная емкостная проводимость ВЛ, B_0 – собственная емкостная проводимость фазы на землю

Учитывая $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$, а также и $\dot{U}_A = 0$, $\dot{U}_B = \dot{E}_B$, $\dot{U}_C = \dot{E}_C$, получим

$$\dot{I}_{\Sigma C} = -jB_M^* l_{ВЛ} \cdot \dot{E}_A, \quad (2)$$

где $|\dot{E}_A| = U_{НР} \sqrt{2/3}$ – амплитуда фазного значения наибольшего рабочего напряжения $U_{НР}$ сети (здесь и далее будут приводиться формулы и результаты расчетов для амплитудных значений составляющих суммарного тока подпитки).

Погонная междуфазная емкостная проводимость может быть найдена как

$$\begin{aligned} B_1^* &= \omega C_1^* = \omega / (v_1 Z_{B1}), \\ B_0^* &= B_S^* = \omega C_0^* = \omega / (v_0 Z_{B0}), \\ B_M^* &= (B_1^* - B_0^*) / 3, \end{aligned} \quad (3)$$

где $Z_{B1} = 250 \div 400$ Ом и $Z_{B0} \approx 2 \cdot Z_{B1}$ – волновые сопротивления ВЛ по прямой и нулевой последовательностям, $v_1 = 3 \cdot 10^8$ м/с и $v_0 = v_1 / 1.5$ [1] – скорости распространения электромагнитной волны вдоль ВЛ по прямой и нулевой последовательностям, $\omega = 2\pi f = 314$ рад/с.

При искажении питающего напряжения высшими гармоническими составляющими (что возможно вблизи объектов постоянного тока) высшие гармоники

напряжения будут создавать соответствующие гармоники тока в дуге. Чем выше будет частота гармонической составляющей, тем меньшее сопротивление ей придется преодолеть при проникновении в поврежденную фазу ВЛ.

Поскольку междуфазная емкостная проводимость зависит от частоты приложенного напряжения, при наличии в нем искажений происходит увеличение тока подпитки дуги замыкания на землю за счет высших гармонических составляющих.

Учитывая электрофизические свойства дуги замыкания на землю [2], можно сделать вывод о том, что увеличение тока подпитки и его частоты приводит к нагреву канала дуги и существенному снижению вероятности ее гашения.

По данным [1], допустимое амплитудное значение тока подпитки составляет 30÷70 А. Однако, это значение позволяет обеспечить гашение дуги при отсутствии искажений. Представляется, что при увеличении частоты тока в дуге допустимое значение должно быть снижено, что требует проведения дополнительных исследований.

III. СХЕМА ИССЛЕДУЕМОЙ СИСТЕМЫ

Преобразователь напряжения можно рассматривать как управляемый источник напряжения. С точки зрения электроэнергетической системы ПН ведет себя как безынерционная синхронная машина, и может быстро регулировать потоки активной и реактивной мощности практически независимо друг от друга.

Характерная конструкция вставки постоянного тока на преобразователях напряжения, состоящая из преобразователей напряжения, преобразовательных трансформаторов, фильтров на стороне переменного тока, фазных ректоров, конденсаторных батарей на стороне постоянного тока, представлена на рис. 2.

Для определения влияния ВПТН на токи короткого замыкания в примыкающей энергосистеме использовалась модель ВПТН в *Simulink Matlab*. Модель ВПТН в *Simulink* состоит из моделей силовой части преобразователей и моделей их систем управления и защиты.

Схема системы управления каждого из двух преобразователей идентична и состоит из следующих основных блоков: блока фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), регулятора активной мощности, регулятора напряжения на шинах переменного тока, регулятора реактивной мощности, регулятора напряжения на шинах постоянного тока. На рис. 3 представлена общая структура системы регулирования ВПТН.

В системе управления предусмотрены различные варианты закона управления, позволяющие

преобразователю решать ту или иную задачу. Управление режимами работы осуществляется переключателями *Mode*. Если переключатель sw_1 находится в положении 1, преобразователь регулирует переменное напряжение в точке подключения ведомого системой управления преобразователя. Во втором положении переключателя sw_1 преобразователь является источником реактивной мощности, необходимая величина которой определяется оператором преобразователя и задается уставкой (Q_{ref}) исходя из нужд системы электроснабжения. Если переключатель sw_2 находится в положении 1, преобразователь регулирует напряжение на стороне постоянного тока в соответствии с заданной уставкой U_{dcref} . Во втором положении переключателя sw_2 преобразователь поддерживает передаваемую активную мощность на заданном уровне P_{ref} за счет регулирования угла напряжения на шинах преобразователя.

В системе реализована концепция векторного управления. При этом регулирование напряжения преобразователя происходит за счет изменения тока подпитки в систему переменного тока. Векторная система предусматривает перевод величин напряжений и токов из трехфазной системы координат во вращающуюся систему dq координат [3].

Основные параметры силовой части блока ПН следующие.

Номинальная частота сети, Гц	50
Номинальное напряжение сети, кВ	220
Номинальное напряжение вторичной обмотки преобразовательного трансформатора, кВ	38,5
Полная мощность, МВА	240
Номинальная передаваемая (активная) мощность, МВт	±200
Номинальная мощность генерации и потребления реактивной мощности, Мвар	133
Емкость одного плеча конденсаторной батареи, мкФ	2240

Параметры модели силовой части ВПТН следующие.

Индуктивное сопротивление реактора, приведенное к напряжению 220 кВ

$$X_p = u_{\kappa} \frac{U_c^2}{S_{nn}} = 0,15 \frac{220^2 \cdot 10^6}{240 \cdot 10^6} = 30,25 \text{ Ом} \quad (4)$$

Индуктивное сопротивление трансформатора, приведенное к напряжению 220 кВ

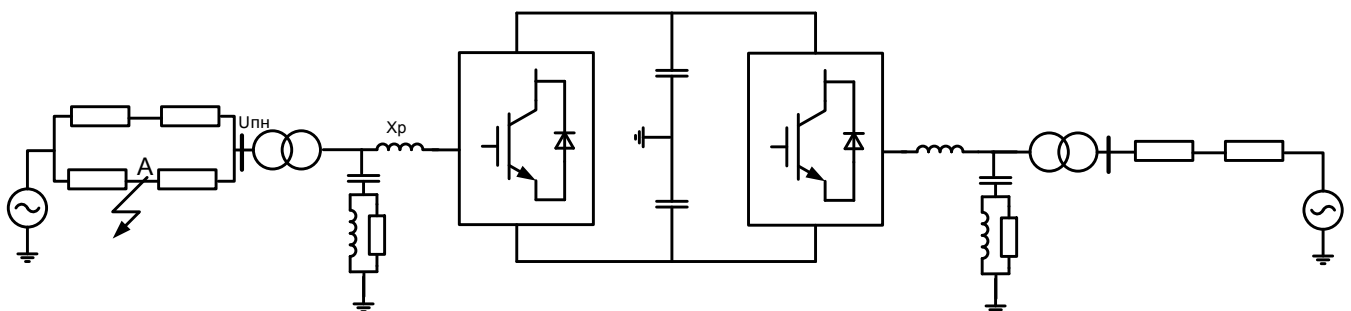


Рис.2. Базовая конфигурация вставки постоянного тока на преобразователях напряжения

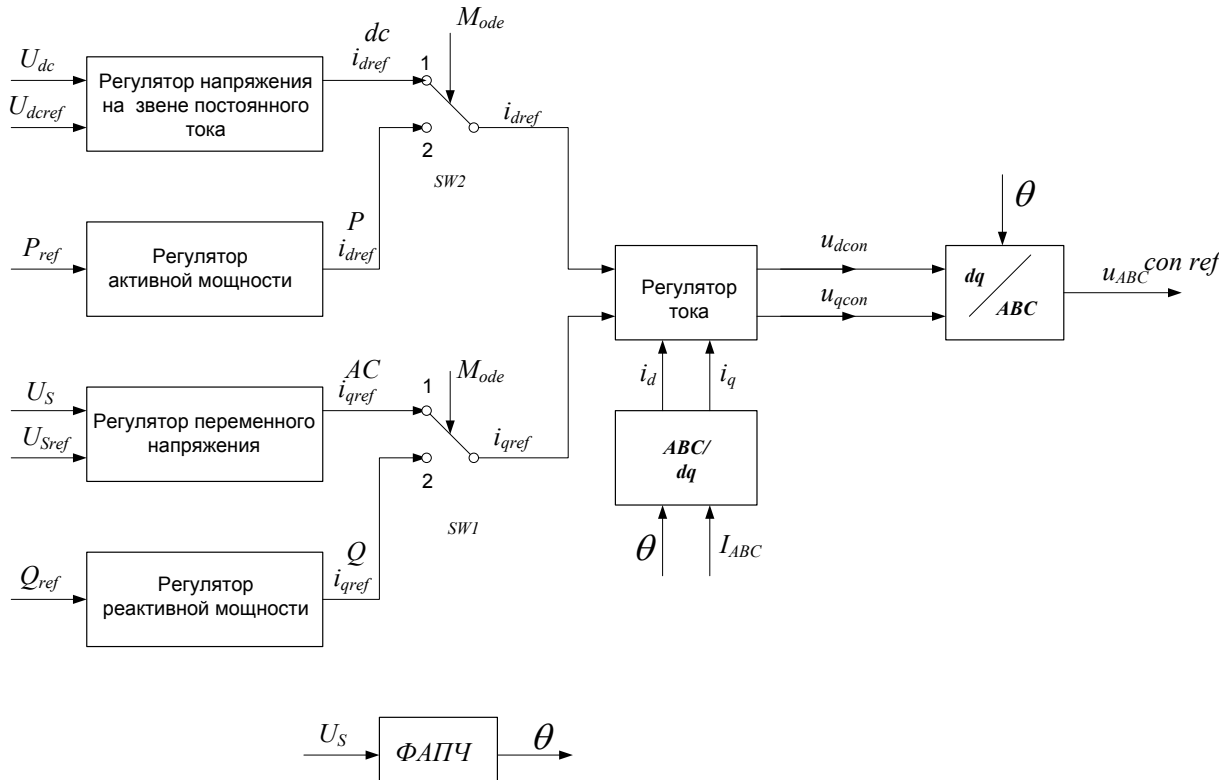


Рис. 3. Общая структура системы регулирования преобразователя напряжения (U_s – измеренное напряжение сети переменного тока, U_{sref} – напряжение уставки сети переменного тока, i_{dref}^{dc} , i_{dref}^P , i_{qref}^{AC} , i_{qref}^Q – уставки для регуляторов тока, формируемые регулятором напряжения на звене постоянного тока, регулятором активной мощности, регулятором напряжения на стороне переменного тока, регулятором реактивной мощности, i_{dref} , i_{qref} – уставки для регулятора тока по d и q – составляющим тока, ABC/dq – блок перевода из трехфазной системы координат ABC в dq – систему координат, I_{ABC} – ток в первичной обмотке преобразовательного трансформатора, θ – выходная переменная блока ФАПЧ, u_{dcon} , u_{qcon} – d и q – составляющие напряжения преобразователя, $u_{ABC}^{con ref}$ – управляющие сигналы для формирователя импульсов управления вентилями

$$X_m = u_k \frac{U_c^2}{S_{nn}} = 0,15 \frac{220^2 \cdot 10^6}{240 \cdot 10^6} = 30,25 \text{ Ом} \quad (5)$$

Примыкающие линии со стороны выпрямителя и инвертора (см. рис. 3) представлены ячеечными схемами замещения: значения индуктивности прямой последовательности – 1,39 мГн/км, нулевой последовательности – 5,54 мГн/км, емкости прямой последовательности – 8,29 нФ/км, нулевой последовательности – 4,15 нФ/км.

IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВПТН НА ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ЦИКЛЕ ОДНОФАЗНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ЛИНИИ В ПРИМЫКАЮЩЕЙ СЕТИ

В работе были проведены исследования влияния преобразователя напряжения на процессы, протекающие в цикле ОАПВ в линии в примыкающей сети.

Однофазное короткое замыкание в фазе А происходит в средней точке одной из цепей линии, соединяющей шины системы и шины преобразовательного трансформатора со стороны выпрямителя. Моделируемая последовательность событий в этом процессе такова: $t=1,4$ с – начало однофазного короткого замыкания, $t=1,46$, $1,48$ с – отключение выключателей линии. ВПТН работает в соответствии с заложенными в ее систему

регулирования алгоритмами: выдача реактивной мощности увеличивается для поддержания напряжения на шинах выпрямителя, значение передаваемой активной мощности поддерживается равным заданной уставке, что подтверждается полученными осциллограммами

Результаты математического моделирования представлены на рис. 4 и 5. Рисунки включают осциллограммы кривых и их амплитудные спектры (полученные при помощи быстрого преобразования Фурье – FFT ; амплитуды различных гармоник представлены в процентах от основной гармоники 50 Гц). На рис. 4 представлена осциллограмма тока дуги в установившемся режиме после отключения этой фазы выключателями.

Действующее значение основной гармоники тока дуги составляет 8,71 А. Однако, как видно из рис. 4, в токе подпитки преобладают высшие гармоники. Значения наиболее выраженных гармоник тока в процентах от основной гармоники:

- 10-я – 83%,
- 11-я – 398%,

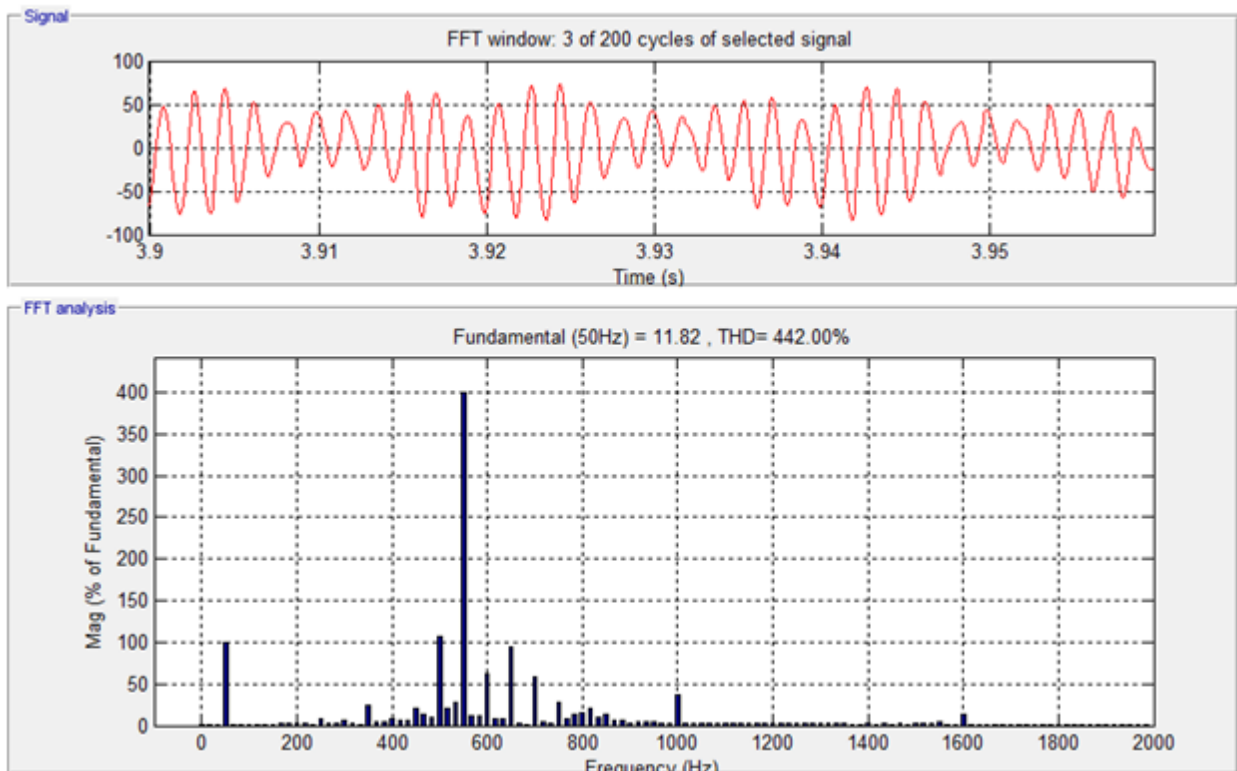


Рис. 4. Осциллограмма тока дуги в установившемся режиме после отключения этой фазы выключателями, разложение тока дуги в ряд Фурье (*THD* – *Total Harmonic Distortion* – суммарный коэффициент гармонических искажений)

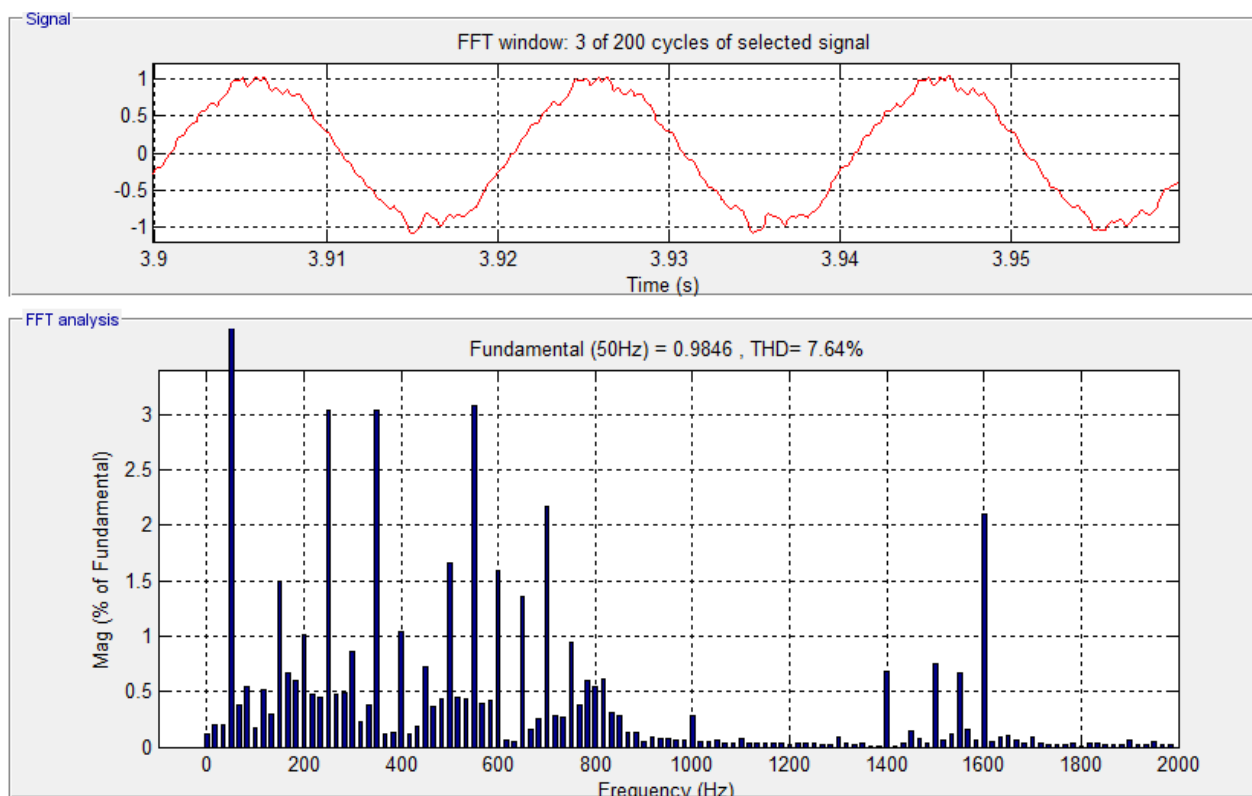


Рис. 5. - Осциллограмма напряжения на шинах преобразовательного трансформатора в установившемся режиме после отключения этой фазы выключателями, разложение напряжения в ряд Фурье

- 13-я – 90%,
- 14-я – 59%,
- 16-я – 96%.

При этом, наибольшее мгновенное значение тока в дуге достигает 70-80 А.

На рис. 5 представлена осциллограмма напряжения фазы А на шинах преобразовательного трансформатора. Значения наиболее выраженных гармоник напряжения в процентах от основной гармоники:

- 10-я – 1,59%,
- 11-я – 3,15%,
- 13-я – 1,44%,
- 14-я – 2,24%,
- 16-я – 3,34%.

Частотный спектр и величина гармоник тока в фазе после отключения короткого замыкания будет зависеть от спектра гармоник, генерируемых преобразователем, а также от параметров примыкающей линии. Спектр гармоник, генерируемых преобразователем определяется особенностями системы управления, используемыми вентилями, а также составом фильтровых устройств преобразователя.

Таким образом, в примыкающих к источникам высших гармоник линиях, расчет цикла ОАПВ должен выполняться с учетом возможного искажения питающего напряжения. Указанная мера необходима для корректного расчета тока подпитки, выбора фильтрокомпенсирующих устройств, оценки целесообразности использования ОАПВ как меры по повышению надежности сети.

V. ВЫВОДЫ

В статье рассмотрено влияние объектов постоянного тока, выполненных на основе преобразователей

напряжения, на процессы при однофазных автоматических повторных включениях примыкающих линий. Для определения влияния ВПТН на токи короткого замыкания в примыкающей энергосистеме использовалась трехфазная модель, реализованная в *Simulink Matlab*, состоящая из моделей силовой части преобразователей, их системы управления и защиты, а также моделей примыкающей сети. Результаты исследований показали, что в токе подпитки однофазного короткого замыкания на землю имеются высшие гармоники, которые могут в разы превышать составляющую промышленной частоты. Частотный спектр и величина гармоник тока подпитки после двустороннего отключения поврежденной фазы ВЛ зависит от спектра гармоник напряжения, генерируемых преобразователем, а также от параметров примыкающей сети, от удаленности точки короткого замыкания от шин преобразователя. В электрических сетях, примыкающих к источникам высших гармоник, расчет цикла ОАПВ должен выполняться с учетом возможного искажения питающего напряжения.

Список литературы

- [1] Евдокунин Г. А. Электрические системы и сети. СПб.: Синтез Бук, 2011. 284 с.
- [2] Рюденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах. Под ред. В.Ю. Ломоносова. М.: Издательство зарубежной литературы, 1955. 714 с.
- [3] Amimaser Yazdani, Reza Iravani, Voltage-Sourced Converters in Power Systems, Wiley-IEEE press, 2010.

References

- [1] Evdokunin G.A. *Electrichekie sistemy i seti* [Power systems], Saint-Petersburg: Sintez Book, 2011, 284 pp.
- [2] Rüdénberg R. *Perekhodnye processy v electroenergeticheskikh sistemakh* [Power system transients], Moscow: Izdatelstvo zarubezhnoy literatury, 1955, 714 pp.
- [3] Amimaser Yazdani, Reza Iravani, Voltage-Sourced Converters in Power Systems, Wiley-IEEE press, 2010.