

УДК 621.3

А.А. Асабин¹, А.А. Кралин¹, Е.В. Крюков¹, Е.А. Чернов¹, Г.Б. Онищенко²**СПОСОБЫ ПЛАВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА ВОЛЬТОДОБАВКИ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
НПФ «Приводная техника», г. Москва²

Статья посвящена анализу алгоритмов плавного регулирования переменного напряжения, применяемых в тиристорных регуляторах напряжения. Рассмотрены принцип работы системы управления и функциональные схемы при однозонном и двухзонном способах регулирования напряжения. Установлено, что оптимальным является двухзонный поочередный способ управления, не требующий применения датчика тока и позволяющий сохранить работоспособность в режиме холостого хода трансформатора.

Ключевые слова: интеллектуальные сети, тиристорный регулятор напряжения, алгоритмы управления, импульсно-фазовое управление.

Одной из актуальных задач энергетической стратегии России является переоснащение и повышение технического уровня распределительных сетей среднего напряжения. Получение оптимального уровня напряжения, а также регулирование потоков активной и реактивной мощностей требуют внедрения новых автоматизированных интеллектуальных распределительных электрических сетей классов напряжений 6–20 кВ [1, 2]. Интеллектуальные сети могут быть реализованы путем внедрения в структуру электрической сети устройств продольной, поперечной и продольно-поперечной компенсации на основе тиристорных регуляторов вольтодобавки (ТРВД) [3, 4]. ТРВД, выполненные на основе полупроводниковых устройств силовой электроники, обладают большим ресурсом работы, лучшим быстродействием по сравнению с электромеханическими регуляторами, лучшими массогабаритными показателями по сравнению с трансформаторами с подмагничиванием и феррорезонансными регуляторами, а также большей перегрузочной способностью по сравнению с транзисторными регуляторами напряжения.

Одной из важнейших задач проектирования ТРВД является разработка алгоритмов импульсно-фазового управления, обеспечивающих плавное изменение выходного напряжения при суммарном коэффициенте гармонических составляющих, удовлетворяющем требованиям ГОСТ к качеству электроэнергии [5]. Импульсно-фазовый способ управления в разных вариантах применяется в тиристорных регуляторах переменного напряжения с расположением тиристорных коммутаторов на вторичной стороне силового трансформатора. Представляется целесообразным рассмотреть основные варианты алгоритмов импульсно-фазового управления, применимых в тиристорных регуляторах напряжения [5].

Изменение величины потока мощности производится путем плавного регулирования величины напряжения на высокой стороне трансформатора. В настоящее время известны следующие способы плавного регулирования переменного напряжения, применяемые в тиристорных регуляторах напряжения с импульсным управлением на основной частоте.

- однозонное регулирование;
- двухзонное регулирование.

При однозонном способе регулирования выходного напряжения выполнимо только в интервалах положительного знака мощности (P_+), в которых напряжение и ток нагрузки имеют одинаковые знаки. Регулирование в интервалах отрицательного знака мощности (P_-), соответствующих несовпадению знаков напряжения и тока нагрузки, при данном способе не

производится. Рассмотрим работу данного способа на примере одной фазы ТРВД при регулировании в пределах одной регулировочной ступени (рис. 1). Диаграммы импульсов управления тиристорами и формы кривых напряжения и тока для однозонного регулирования при работе ТРВД на активно-индуктивную нагрузку приведены на рис. 2. В интервалах положительных и отрицательных значений напряжения сети происходит формирование импульсов управления тиристорами $VS3$ и $VS4$ отводов пониженного напряжения соответственно. Импульсы управления на тиристоры $VS1$ и $VS2$ отводов повышенного напряжения задерживают относительно начала полупериодов на угол переключения α . Коммутация тиристоров осуществляется под действием напряжения регулировочной ступени.

Рассмотрим процессы переключения тиристоров на интервале одного периода изменения напряжения сети. В полупериоде положительных значений напряжения сети с момента времени, соответствующего фазовому углу нагрузки φ_H , во включенном состоянии находится тиристор $VS3$ отвода пониженного напряжения. При этом к нагрузке приложено напряжение низкого уровня $u_{ВН}=u_1$, равное напряжению сетевой обмотки ($u_1=u_{co}$). В момент времени, соответствующий углу переключения α , на тиристор $VS1$ подается управляющий импульс. Он включается, поскольку находится под действием прямого напряжения, и через него (под действием ЭДС ступени) встречно направлению проводимости $VS3$ начинает протекать коммутационный ток. Как только величина коммутационного тока достигнет величины нагрузочной составляющей тока, тиристор $VS3$ выключается, и во включенном состоянии остается только тиристор $VS1$. С этого момента времени к нагрузке приложено напряжение повышенного уровня $u_{ВН}=u_2$, равное сумме напряжений сетевой обмотки и регулировочной ступени ($u_2=u_{co}+u_{ст}$). Состояние схемы не изменится до тех пор, пока ток через тиристор $VS1$ не перейдет через ноль в момент времени $\omega t=\pi+\varphi_H$. При этом тиристор $VS1$ выключается и ток i_H переходит на тиристор $VS4$. Напряжение нагрузки уменьшается до уровня пониженного напряжения $u_{ВН}=u_1$. Это состояние схемы сохраняется до момента времени $\omega t=\pi+\alpha$, в который включается тиристор $VS2$ и выполняется переключение на уровень повышенного напряжения. Описанные процессы далее периодически повторяются.

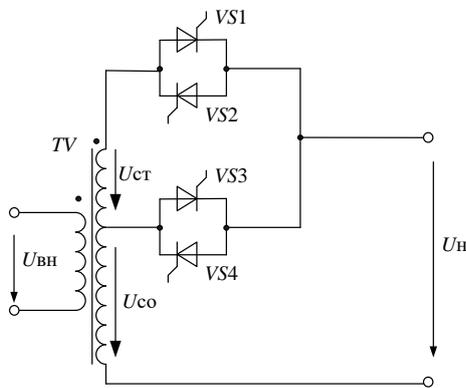


Рис. 1. Упрощенная схема одной фазы ТРВД

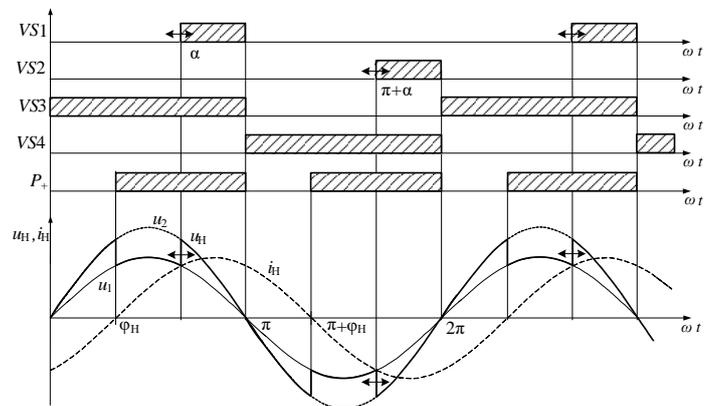


Рис. 2. Диаграммы импульсов управления тиристорами ($VS1$ - $VS4$), напряжения (u_H) и тока (i_H) нагрузки однозонного ТРВД

Плавное изменение значения угла переключения α в пределах интервалов P_+ приводит к изменению момента повышения напряжения нагрузки и, как следствие, к плавному регулированию напряжения нагрузки в пределах регулировочной ступени. Следует отметить, что при данном способе формирования импульсов управления переход на уровень пониженного напряжения осуществляется строго в моменты, соответствующие значению фазового угла нагрузки φ_H . Поэтому плавное регулирование напряжения в интервалах отрицательного знака мощности невозможно и в регулировочных характеристиках однозонных ТРВД имеются раз-

рывы первого рода. Данный недостаток устраняется при использовании двухзонного регулирования. Способы двухзонного регулирования характеризуются возможностью плавного регулирования выходного напряжения как в интервале положительного (P_+), так и в интервале отрицательного знака мощности (P_-). Причем переключения на повышение напряжения выполняют в интервалах положительного знака мощности, а на понижение – в интервалах отрицательного знака мощности. Коммутация тиристоров при выполнении переключений выполняется под действием напряжения регулировочной ступени аналогично описанному для ТРВД с однозонным регулированием. Способы двухзонного регулирования делятся на два вида:

- 1) способ двухзонного одновременного регулирования;
- 2) способ двухзонного поочередного регулирования.

Первый способ, в зависимости от используемого метода синхронизации фазосмещающего устройства (ФСУ), подразделяется на два варианта:

- а) двухзонное одновременное регулирование с синхронизацией ФСУ сигналами положительных и отрицательных интервалов знака мощности;
- в) двухзонное одновременное регулирование с синхронизацией ФСУ сигналами перехода напряжения сети через нулевые значения.

Функциональная схема ТРВД с двухзонным одновременным регулированием и синхронизацией по интервалам знака мощности изображена на рис. 3. На функциональной схеме обмотки учтены в виде источников ЭДС.

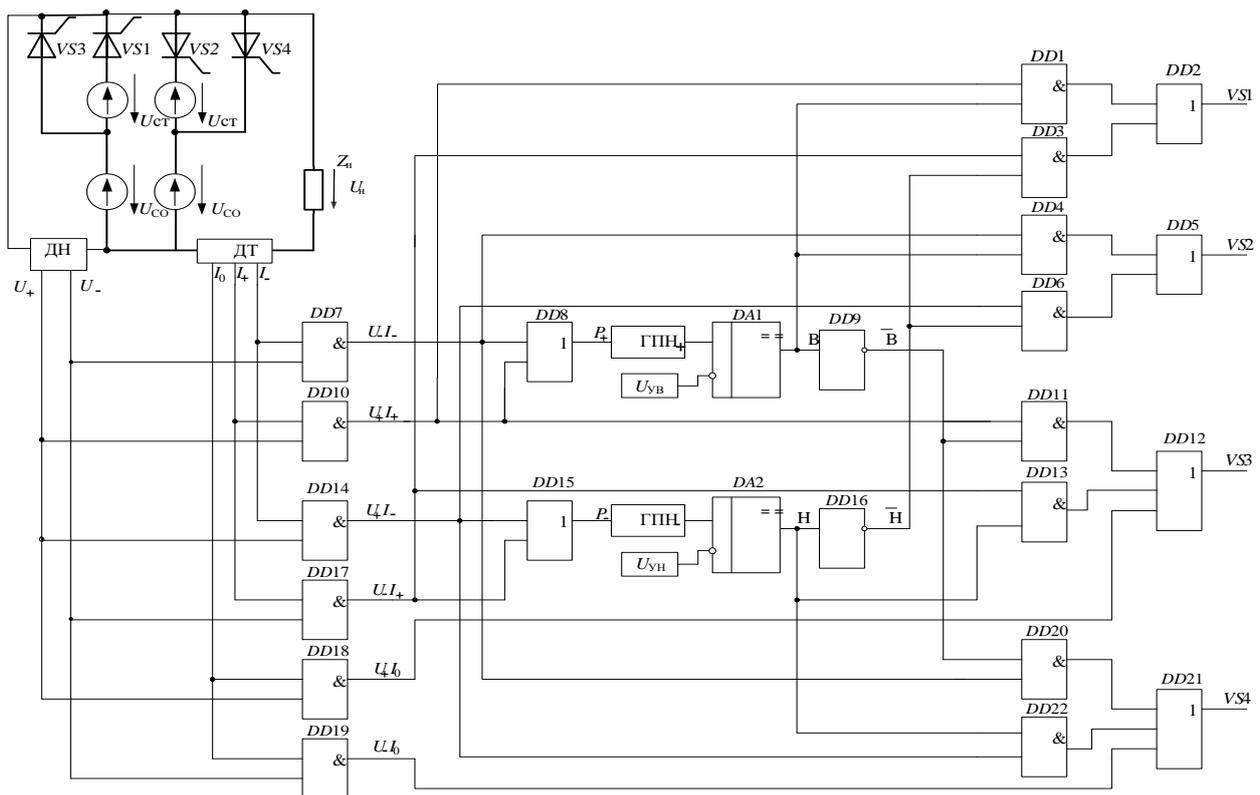


Рис. 3. Функциональная схема ТРВД с двухзонным одновременным регулированием и синхронизацией по интервалам знака мощности

Выделение интервалов положительного (P_+) и отрицательного (P_-) знаков мощности выполняется по сигналам датчика тока ДТ и датчика напряжения ДН. Датчик тока формирует сигнал логической единицы на выходе I_+ в интервалах положительных значений тока нагрузки. На выходе I_- сигнал логической единицы формируется в интервалах отрицательных значений тока нагрузки. На выходе I_0 датчика тока появляется сигнал логической единицы при переходе тока нагрузки через нулевое значение. Принцип формирования сигналов датчика

напряжения U_+ и U_- аналогичен принципу формирования сигналов I_+ и I_- , соответственно. В интервалах положительного знака мощности напряжение и ток нагрузки имеют одинаковые знаки. Поэтому сигнал P_+ определяется логическим выражением $P_+ = U_- \cdot I_+ + U_+ \cdot I_+$, реализованным на элементах $DD7, DD8, DD10$ (рис. 3). В интервалах отрицательного знака мощности напряжение и ток имеют противоположные знаки. Поэтому сигнал P_- определяется элементами $DD14, DD15, DD17$ (рис. 3) по логическому выражению $P_- = U_+ \cdot I_+ + U_- \cdot I_+$.

Сигналами P_+ и P_- синхронизируется работа генераторов пилообразного напряжения ГПН $_+$ и ГПН $_-$, соответственно. Опорное напряжение с выхода ГПН $_+$ сравнивается компаратором $DA1$ с напряжением управления $U_{ув}$, определяющим момент переключения на повышение напряжения относительно начала интервала положительного знака мощности. При превышении пилообразным сигналом, напряжения управления $U_{ув}$ формируется сигнал «выше» (В), разрешающий подачу управляющих импульсов на тиристоры $VS1$ и $VS2$ ответвления повышенного напряжения. Аналогично напряжение с выхода ГПН $_-$ сравнивается на компараторе $DA2$ с управляющим напряжением $U_{ун}$, определяющим момент переключения на понижение напряжения. При этом формируется сигнал «ниже» (Н), разрешающий подачу управляющих импульсов на тиристоры $VS3$ и $VS4$ ответвления пониженного напряжения.

Принцип распределения управляющих импульсов по тиристорам для данной схемы можно описать в виде системы логических уравнений:

$$\begin{aligned} VS1 &= B \cdot U_+ \cdot I_+ + \overline{H} \cdot U_- \cdot I_+ \\ VS2 &= B \cdot U_- \cdot I_- + \overline{H} \cdot U_+ \cdot I_- \\ VS3 &= H \cdot U_- \cdot I_+ + \overline{B} \cdot U_+ \cdot I_+ + I_0 \cdot U_+ \\ VS4 &= H \cdot U_+ \cdot I_- + \overline{B} \cdot U_- \cdot I_- + I_0 \cdot U_- \end{aligned} \quad (1)$$

Первое слагаемое в каждом выражении определяет непосредственно интервал формирования импульсов управления на повышение (для $VS1$ и $VS2$) или на понижение (для $VS3$ и $VS4$) напряжения в интервале времени, когда для соответствующего тиристора выполняются условия его безаварийного включения. Второе слагаемое в каждом выражении предотвращает самопроизвольное выключение тиристоров при значениях тока нагрузки, близких к току удержания тиристоров. Третье слагаемое в двух последних выражениях исключает выключение схемы при переходе тока нагрузки через нулевое значение.

Регулирование выходного напряжения ТРВД реализуется путем изменения уровней управляющих напряжений $U_{ув}$ и $U_{ун}$. Напряжение на выходе ТРВД будет соответствовать напряжению сетевой обмотки, если $U_{ун} \approx 0$ и $U_{ув}$ на уровне амплитуды пилообразного напряжения ГПН $_+$. Напротив, если $U_{ув} \approx 0$, а значение $U_{ун}$ превышает или равно максимальному значению пилообразного напряжения ГПН $_-$, то напряжение на нагрузке будет соответствовать сумме $U_{CO} + U_{CT}$, так как переключения на понижение будут практически отсутствовать. Таким образом можно плавно регулировать действующее значение напряжения на нагрузке в пределах ступени регулирования.

Функциональная схема ТРВД с синхронизацией по нулям напряжения представлена на рис. 4. Для реализации данного способа, как и в предыдущем случае, необходимо производить определение знаков мощности. Следовательно, необходимо определять моменты перехода через ноль тока и напряжения нагрузки. Это требует введения в схему соответствующих датчиков. Главное же отличие способа регулирования с синхронизацией по нулям напряжения от способа регулирования с синхронизацией по интервалам знака мощности заключается в том, что в данном алгоритме используется только одно опорное напряжение. Опорное напряжение пилообразной формы синхронизируется сигналами перехода через ноль (U_0) напряжения сети. С опорным напряжением сравниваются два сигнала управления на повышение $U_В$ и понижение $U_Н$ напряжения. В результате сравнения пилообразного напряжения с управляющими сигналами на повышение $U_В$ и понижение $U_Н$ напряжения вырабатываются сигналы выше (В) и ниже (Н). Благодаря членам $B \cdot U_+ \cdot I_+$ и $\overline{B} \cdot U_- \cdot I_-$ в логических уравнениях (1), переключение на

повышение напряжения не может произойти раньше, чем начнётся интервал положительного знака мощности. Аналогично благодаря членам $H \cdot U_+ \cdot I_-$ и $H \cdot U_- \cdot I_+$ переключение на понижение напряжения может происходить только в интервалах отрицательного знака мощности.

Достоинством данного алгоритма по сравнению с предыдущим является наличие только одного пилообразного напряжения. Это упрощает систему управления. Если в процессе работы происходит изменение фазового угла нагрузки φ_n , пилообразное напряжение остается неизменным, а изменяется только соотношение промежутков времени в течение которых могут происходить переключения на повышение и понижение напряжения.

Оба алгоритма могут работать с активной, активно-индуктивной, индуктивной, активно-емкостной, емкостной нагрузках и нагрузкой противофазным током. Общим недостатком данных способов является невозможность регулирования напряжения в режимах близких к холостому ходу. Это объясняется невозможностью определения знака тока вследствие ограниченной чувствительности датчика тока. В результате становится невозможным определение знаков мощности и происходит нарушение регулировочных свойств ТРВД. Данный недостаток устраняется в ТРВД с двухзонным поочередным регулированием.

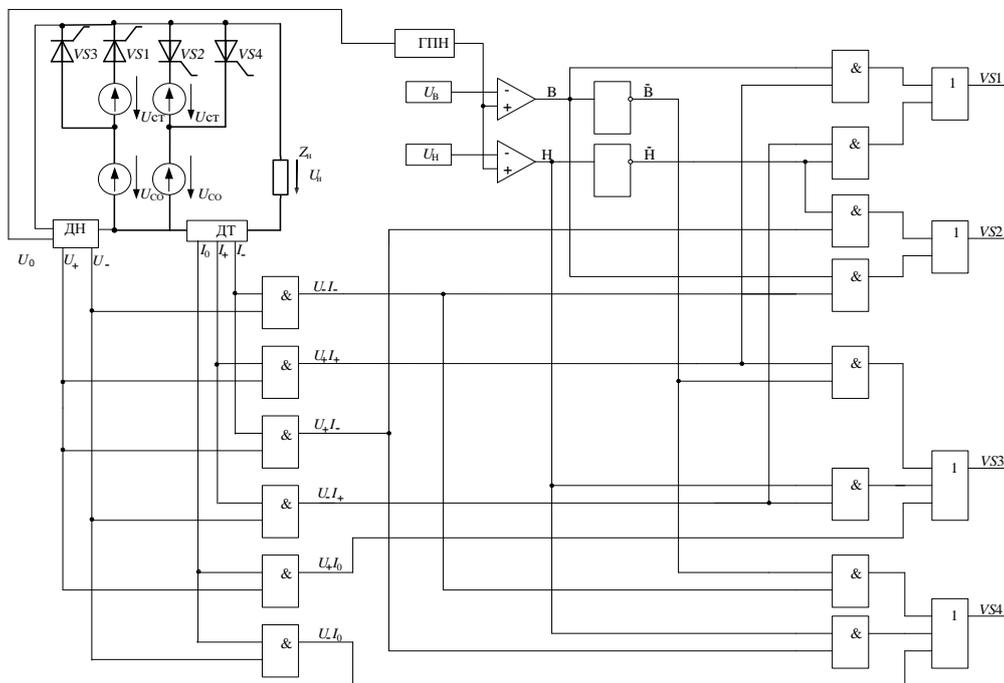


Рис. 4. Функциональная схема системы управления ТРВД с синхронизацией по нулям напряжения

Функциональная схема ТРВД с двухзонным поочередным регулированием показана на рис. 5. Схема управления содержит формирователь синхроимпульсов (ФСИ), независимое фазосмещающее устройство (НФСУ), зависимое фазосмещающее устройство (ЗФСУ) и формирователь импульсов управления тиристорами высшей степени регулирования (ФИУВС).

Формирователь синхроимпульсов ФСИ подключен к зажимам сетевой обмотки трансформатора и вырабатывает на выходе U_{0+} датчика напряжения ДН импульсный сигнал при переходе напряжения сети от отрицательного к положительному значению. На выходе U_{0-} датчика ДН формируется синхроимпульс при переходе напряжения сети от положительного к отрицательному значению. Сигналы выходов U_{0+} , U_{0-} синхронизируют работу RS-триггера DD1 и генератора пилообразных напряжений ГПН независимого фазосмещающего устройства НФСУ. Сигнал U_+ , формируемый на прямом выходе RS-триггера, опережает положительный полупериод напряжения сети на угол θ_k . Сигнал U_- , формируемый на инверсном выходе DD1, опережает отрицательную полуволну напряжения сети на такой же угол.

Синхроимпульсами, поступающими с выходов датчика ДН, производится обнуление выходного сигнала генератора пилообразных напряжений. Поэтому на его выходе формируется линейно возрастающий сигнал на каждом полупериоде сетевого напряжения. Данный сигнал поступает на инверсные входы компараторов $DA1$ и $DA3$ фазосмещающих устройств. На прямой вход компаратора $DA1$ независимого фазосмещающего устройства поступает напряжение управления U_y . Увеличение напряжения управления от 0 до амплитудного значения пилообразного напряжения $U_{мпн}$ позволяет с помощью НФСУ изменять угол переключения тиристоров на повышение напряжения от 0 до π и обеспечивать эффективное регулирование напряжения регулятора в интервалах положительного знака мощности.

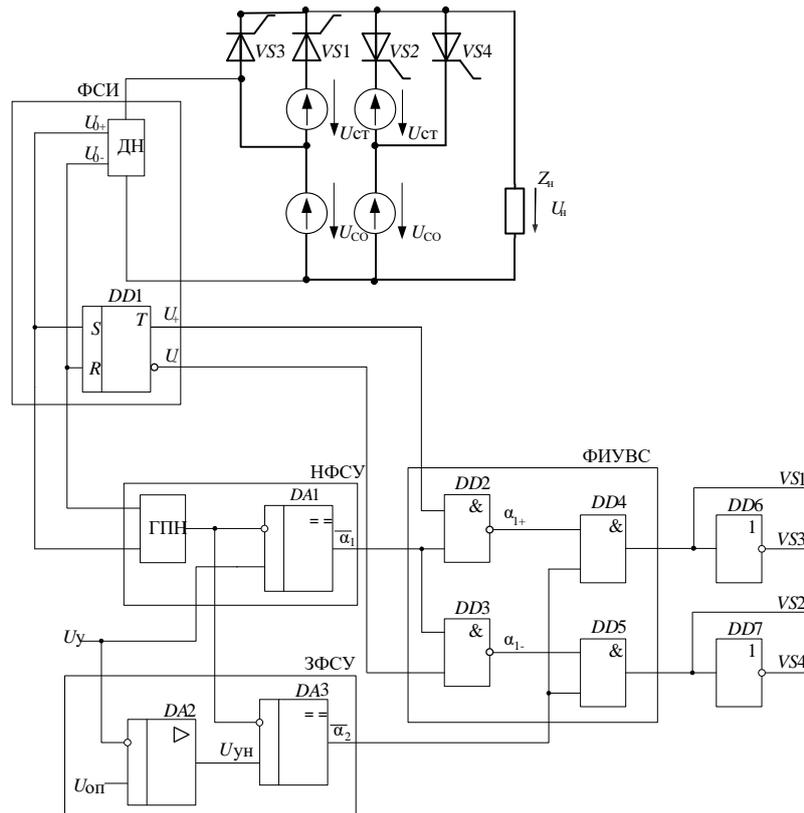


Рис. 5. Функциональная схема ТРВД с двухзонным поочередным регулированием

Увеличение напряжения управления в диапазоне $U_{мпн} \leq U_y \leq 2U_{мпн}$ позволяет с помощью ЗФСУ изменять угол переключения тиристоров на понижение напряжения от π до 0 и обеспечить эффективное регулирование напряжения в интервалах отрицательных знаков мощности. Реализация данного способа не требует применения датчика тока нагрузки. Следовательно, регулировочные свойства сохраняются и в режиме холостого хода трансформатора включительно.

Заключение

1. В ТРВД с однозонным регулированием при работе на активно-индуктивную и активно-емкостную нагрузку диапазон регулирования уменьшается на величину, пропорциональную фазовому углу нагрузки. При противофазном токе нагрузки данный способ регулирования не может быть применён ввиду отсутствия интервалов положительного знака мощности.
2. Двухзонное регулирование на основной частоте позволяет выполнять переключения тиристоров в обоих интервалах знака мощности. Следовательно, алгоритмы, реализующие двух-

зонное регулирование напряжения, могут работать на активную, активно-реактивную, реактивную нагрузки и нагрузку с противофазным током. Их диапазон регулирования определяется напряжением регулировочной ступени трансформатора.

3. ТРВД с двухзонным поочередным управлением не требуют применения датчика тока, и их работоспособность сохраняется также в режиме холостого хода трансформатора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0242 о предоставлении субсидии от 26.09.2017, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0242).

Библиографический список

1. **Соснина, Е.Н.** Основные направления развития интеллектуальных электрических сетей на основе адаптивного управления / Е.Н. Соснина, Р.Ш. Бедретдинов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – № 5. – С. 25-28.
2. **Соснина, Е.Н.** Исследование твердотельного регулятора напряжения и мощности в сети 6–20 кВ. / Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, Р.Ш. Бедретдинов, А.А. Карлин // Пром-инжиниринг. Труды трудов II Международной научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 322-327.
3. **Sosnina, E.N.** Power flow control device prototype tests / Sosnina E., Loskutov A., Asabin A., Bedretdinov R., Kryukov E. // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Asia. – 2016. – P. 312-316.
4. **Соснина, Е.Н.** Тиристорный регулятор величины и фазы вольтодобавочного напряжения в распределительных электрических сетях 6-10 кВ / Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, А.А. Карлин, Е.В. Крюков // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей. – Нижний Новгород, 2017. – С. 132-136.
5. Пат. на изобретение RU №2398342 С1, МПК H02M5/12. Способ управления тиристорным регулятором напряжения трансформатора / Асабин А.А.; Опубл. 27.08.2010.

Дата поступления

в редакцию: 2.10.2018

A.A. Asabin¹, A.A. Kralin¹, E.V. Kryukov¹, E.A. Chernov¹, G.B. Onischenko²

OUTPUT VOLTAGE SMOOTH REGULATION METHODS OF BOOST VOLTAGE THYRISTOR REGULATOR

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev¹,
NPF «Drive Technology», Moscow²

Purpose: The article is devoted to the analysis of smooth regulation algorithms of alternating voltage used in thyristor voltage regulators.

Design/methodology/approach: The principle of control system operation and functional diagrams with single-zone and two-zone voltage control methods are considered.

Findings: It is established that the optimal method is a two-zone alternate control method that does not require the use of a current sensor and allows to maintain the operation in the idling mode of the transformer.

Key words: smart grid, thyristor voltage regulator, control algorithms, pulse-phase control.