

ОБ ОГРАНИЧЕНИИ ГЕНЕРАЦИИ В СЕТЬ РЕАКТИВНОГО ТОКА АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

Ю. Т. Портной, А. С. Абдурагимов, Е. М. Выдумкин

В статье рассматриваются структуры автономных электроэнергетических систем с использованием активных выпрямителей напряжения. Построены векторные диаграммы активных выпрямителей напряжения при стабилизации выходного напряжения в режимах активного потребления, рекуперации реактивной мощности и одновременном потреблении активной мощности и рекуперации реактивной мощности.

Получено соотношение между токами на входе активного выпрямителя напряжения в режимах активного потребления и рекуперации реактивной мощности.

Определены границы рекуперации реактивной мощности при заданных выходных значениях напряжения и тока активного выпрямителя напряжения.

Ключевые слова: активный выпрямитель напряжения, векторная диаграмма, режим активного потребления, режим рекуперации реактивной мощности.

В последнее двадцатилетие значительное распространение получили исследования и разработки активных выпрямителей напряжения (АВН), которые используются как в электроэнергетических системах (ЭЭС) с синхронными генераторами (Γ), включая автономные, содержащие обратимые преобразователи (ОП), так и в системах регулируемых электроприводов (ЭП) с двухзвенными преобразователями частоты [1] – [11].

Структура силовых цепей АВН изображена на рис. 1.

Шесть силовых ключей, представляющих собой IGBT-транзисторы с обратными диодами, обладают полной управляемостью и двусторонней проводимостью тока.

АВН, выполненный по трехфазной мостовой схеме, преобразует фазное напряжение питающей сети переменного тока U_1 в стабилизированное напряжение постоянного тока U_d на конденсаторе фильтра C_Φ , превышающее по величине напряжение U_{d0} неуправляемого выпрямителя.

АВН, который по существу является обращенным автономным инвертором напряжения (АИН), работающим в режиме ШИМ, инвертирует напряжение U_d на фильтровом конденсаторе C_Φ в фазное переменное напряжение U_2 частоты сети различной амплитуды и фазы. Это напряжение совместно с фазным напряжением сети U_1 формирует напряжение на трехфазном дросселе L , определяющее амплитуду и фазу тока сети I_c .

Вследствие использования ШИМ импульсное напряжение на стороне переменного тока, формируемое АВН, имеет оптимальный гармонический состав, обеспечивая практически полную фильтрацию дросселями L высших гармоник тока сети.

Структуры ЭЭС постоянного тока и переменного тока с высокочастотным генератором, содержащие АВН, представлены соответственно на рис. 2 и 3.

В автономную ЭЭС входит обратимый преобразователь, осуществляющий в зарядном и выпрямительном режимах заряд аккумуляторной батареи (АБ) и питание потребителей постоянного тока при

работе синхронного генератора, а в инверторном режиме, когда синхронный генератор выведен из работы, – питание от аккумуляторной батареи ответственных потребителей переменного тока.

Структура ЭЭС, содержащая статический обратимый преобразователь с активным выпрямителем напряжения, представлена на рис. 4.

Трансформатор (Γ) служит для гальванической развязки и согласования уровней напряжений синхронного генератора и АВН.

АВН является обратимым преобразователем, так как может преобразовывать электроэнергию в двух направлениях: от сети переменного тока к сети постоянного тока и обратно.

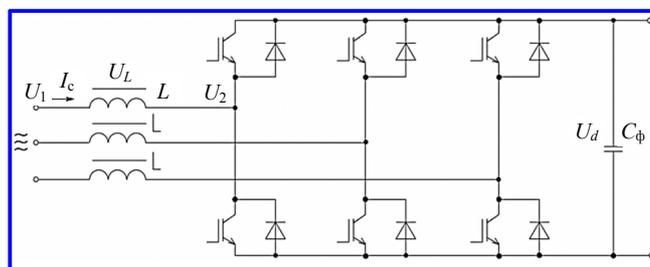


Рис. 1. Структура силовых цепей АВН

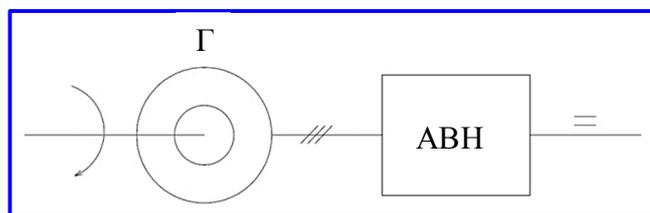


Рис. 2. Структура ЭЭС постоянного тока с АВН

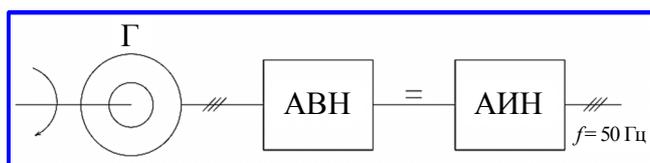


Рис. 3. Структура ЭЭС переменного тока с высокочастотным синхронным генератором и АВН

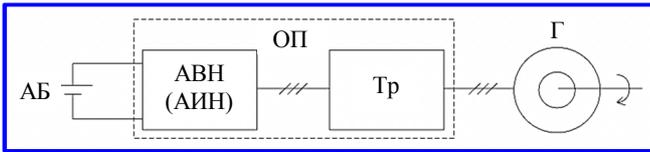


Рис. 4. Структура ЭЭС со статическим обратимым преобразователем с АВН

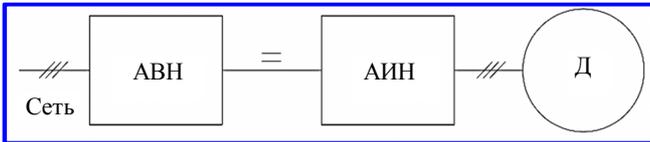


Рис. 5. Структура регулируемого электропривода с двухзвенным преобразователем частоты

В выпрямительном и зарядном режимах АВН работает в качестве активного выпрямителя напряжения, а в инверторном – в качестве автономного инвертора напряжения.

В связи с тем, что АВН повышает выходное напряжение по сравнению с пассивным выпрямителем, в данной структуре трансформатор должен обеспечивать в режиме пассивного выпрямления минимальное напряжение аккумуляторной батареи при максимальном напряжении генератора. При повышении напряжения АБ или снижении напряжения Г АВН обеспечивает необходимое повышение выходного напряжения постоянного тока в выпрямительном и зарядном режимах и необходимое понижение выходного напряжения переменного тока в инверторном режиме, работая в качестве АИН. Это свойство АВН определяет выбор значения коэффициента трансформации Тр, который остается неизменным в выпрямительном, зарядном и инверторном режимах ОП. Например, при линейном напряжении сети переменного тока, равном 380 В, и напряжении АБ, равном 175 – 320 В, коэффициент трансформации Тр (с учетом требований к диапазону изменения напряжения сети переменного тока и обеспечения необходимых запасов по напряжению АВН в выпрямительном, зарядном и инверторном режимах) должен быть примерно равным четырем.

Структура регулируемого электропривода с двигателем переменного тока Д и двухзвенным преобразователем частоты, содержащим АВН и АИН, представлена на рис. 5.

По сравнению с неуправляемым диодным выпрямителем АВН обладает следующими известными преимуществами:

– энергосбережение: для ЭЭС АВН позволяет рекуперировать в сеть ЭЭС активную и реактивную мощности, а для электроприводов – обеспечить их торможение без тормозных резисторов;

– коррекция коэффициента мощности: АВН может работать как с коэффициентом мощности, равным 1, так и с опережающим коэффициентом мощности;

– формирование практически синусоидальной формы тока, потребляемого из сети, сводятся к минимуму высшие гармоники тока;

– повышение выпрямленного напряжения по сравнению с неуправляемым выпрямителем и его регулирование;

– стабилизация значения выпрямленного напряжения;

– улучшение формы выпрямленного напряжения путем устранения гармоник напряжения, кратных частоте сети.

Двумя основными задачами АВН являются стабилизация выпрямленного напряжения U_d и рекуперация в сеть реактивного тока. Из векторных диаграмм АВН (см., например, [3]) следует, что увеличение реактивного тока, которое достигается увеличением напряжения U_2 , приводит к соответствующему увеличению выходного напряжения U_d по сравнению с его номинальным стабилизированным значением $U_{дн}$. Поэтому одновременно решить обе эти задачи не представляется возможным.

Приоритетным для оптимальной работы ЭЭС и ЭП является стабилизация АВН выпрямленного напряжения U_d . При этом условии определим границы возможной рекуперации в сеть реактивного тока.

За базовую примем векторную диаграмму, изображенную на рис. 6 и соответствующую режиму активного потребления ($\cos\varphi = 1$). Здесь и далее пренебрегаем активным сопротивлением дросселя.

На основе этой векторной диаграммы определим величину индуктивности дросселя L_n при номинальном токе сети $I_{сн}$, номинальном напряжении сети $U_{1н}$, номинальной круговой частоте сети $\omega_n = 2\pi f_n$ и необходимой величине напряжения на входе АВН $U_{2н}$, которая определяется требуемой величиной выходного напряжения АВН $U_{дн}$.

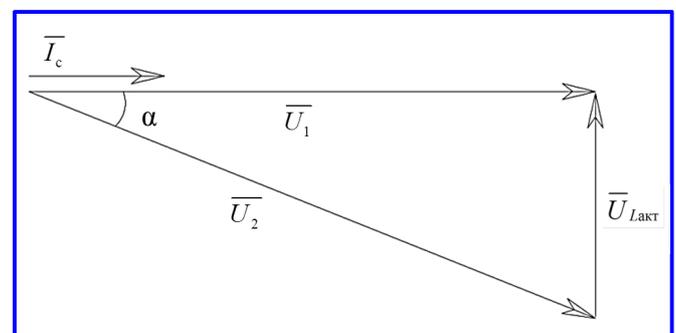


Рис. 6. Векторная диаграмма АВН в режиме активного потребления

Здесь уместно отметить, что минимальное значение выходного напряжения АВН с общепринятой векторной ШИМ, когда $U_2 = U_1$, равно, в отличие от пассивного выпрямителя, $U_{d\min} = \sqrt{2}\sqrt{3}U_1 = 2,45U_1$.

Из рис. 6 следует, что $L_n = \frac{\sqrt{U_{2н}^2 - U_{1н}^2}}{\omega_n I_{сн}}$.

При этом номинальный ток сети $I_{сн} = \sqrt{2} / \sqrt{3} I_{dн}$, где $I_{dн}$ – номинальное значение тока нагрузки АВН, а номинальное входного напряжения АВН равно $U_{2н} = \frac{U_{dн}}{\sqrt{2}\sqrt{3}}$.

Значение угла $\alpha = \arccos(U_1/U_2)$ (см. рис. 6) соответствует коэффициенту повышения выходного напряжения АВН, равному U_2/U_1 .

В дальнейшем при построении векторных диаграмм АВН принимаются:

$$U_1 = U_{1н}; U_2 = U_{2н}; \omega = \omega_n; L = L_n.$$

Векторные диаграммы АВН в режимах активного потребления и генерации реактивной энергии приведены на рис. 7.

Сплошной линией показана векторная диаграмма при активном потреблении (ток сети \bar{I}_c совпадает по фазе с напряжением сети \bar{U}_1), а пунктирной линией показана векторная диаграмма при генерации только реактивной энергии (вектор тока сети \bar{I}'_c опережает вектор напряжения сети \bar{U}_1 на 90° , а вектор напряжения \bar{U}'_2 совпадает с вектором напряжения сети \bar{U}_1); α – угол между векторами \bar{U}_1 и \bar{U}_2 в режиме активного потребления. Окружность – геометрическое место концов векторов \bar{U}_2 и \bar{U}'_2 .

Обозначим падения напряжения на дросселе L при активном потреблении тока и при генерации реактивного тока соответственно $U_{Lакт}$ и $U_{Lреакт}$.

Из векторной диаграммы рис. 7 следует:

$$U_{Lакт} = U_1 \operatorname{tg}\alpha; U_{Lреакт} = U_2 - U_1 = \frac{U_1}{\cos\alpha} - U_1.$$

Обозначим $k = \frac{U_{Lакт}}{U_{Lреакт}} = \frac{\sin\alpha}{1 - \cos\alpha}$. (1)

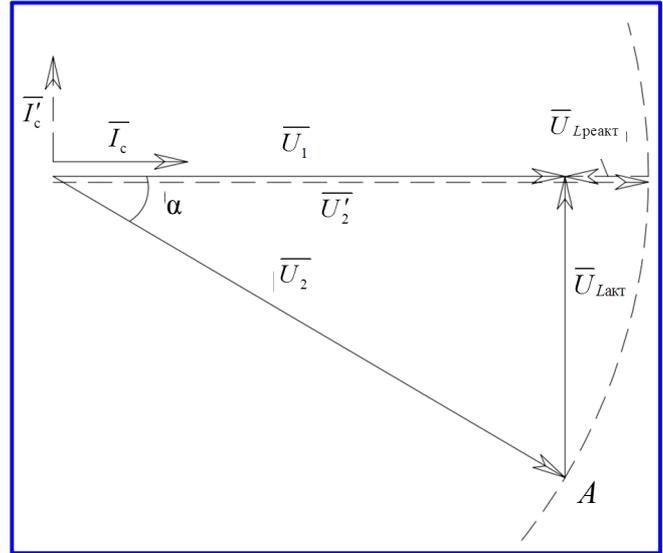


Рис. 7. Векторные диаграммы АВН в режимах активного потребления и генерации реактивной энергии

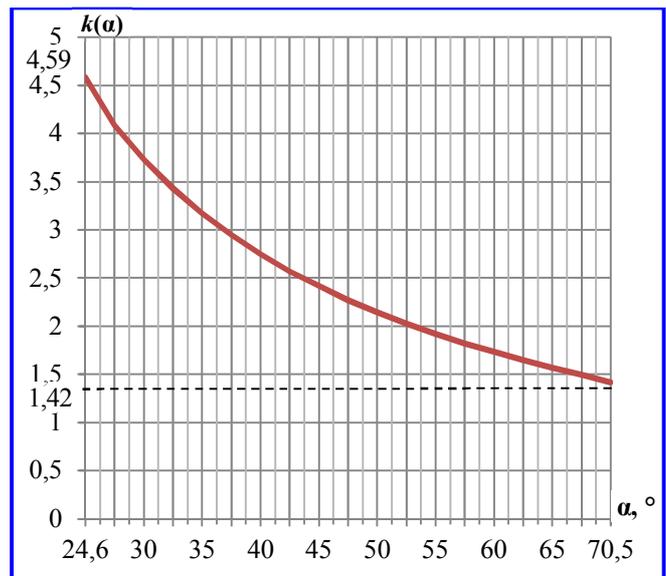


Рис. 8. График зависимости $k = f(\alpha)$

Рассмотрим выражение (1) в диапазоне изменения α , соответствующем изменению входного напряжения АВН в диапазоне $U_2 = 1,1U_1 - 3,0U_1$.

Учитывая, что $\alpha = \arccos(U_1/U_2)$, указанному диапазону изменения напряжения U_2 соответствует изменение угла α примерно от $24,6^\circ$ до $70,5^\circ$.

График зависимости $k = f(\alpha)$ при изменении угла α в указанном диапазоне представлен на рис. 8.

Величина k показывает границы возможностей АВН при генерации в сеть реактивного тока по отношению к потребляемому активному току.

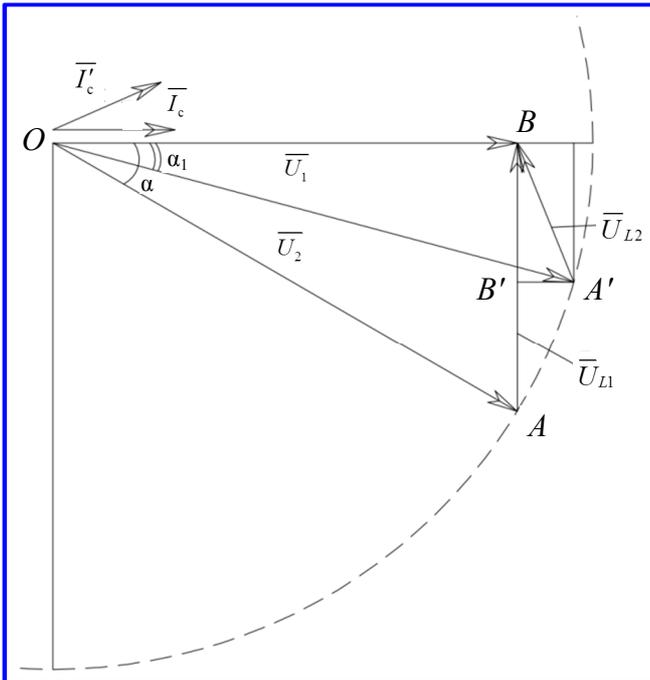


Рис. 9. Векторная диаграмма АВН при одновременном потреблении активного тока и генерации реактивного тока

Так, например, при $\alpha = 45^\circ$ $k = 2,413$. Это означает, что при заданных величинах U_1 , U_d и L при генерации реактивного тока необходимо уменьшить его величину по сравнению с током в режиме активного потребления примерно в 2,413 раза.

Векторная диаграмма АВН при одновременном потреблении активного тока и генерации реактивного тока, когда угол α_1 находится в пределах $0 < \alpha_1 < \alpha$, изображена на рис. 9.

На этой диаграмме имеются два треугольника с двумя равными сторонами $OA = OA'$, $OB \equiv OB'$: первый – OAB, второй – OA'B'.

Из теоремы косинусов следует, что при равенстве двух сторон треугольников третья сторона, лежащая против меньшего угла, будет меньше стороны, лежащей против большего угла (т. е. $BA' < BA$, так как $\alpha_1 < \alpha$).

Следовательно, падение напряжения на дросселе U_{L2} (отрезок BA') в этом режиме меньше, чем падение напряжения на дросселе U_{L1} (отрезок BA) в режиме активного потребления. Поэтому суммарный ток, потребляемый из сети АВН, должен быть соответственно снижен по сравнению с током в режиме активного потребления.

Еще больше снижается в этом режиме по сравнению с режимом активного потребления величина потребляемого из сети активного тока ($BB' < BA' < BA$).

При $I_d < I_{dном}$ в сеть генерируется реактивный ток. Для заданного значения тока нагрузки I_d , с учетом того, что активная составляющая тока сети

$I_{сакт}$ равна $\sqrt{2} / \sqrt{3} I_d$, значение генерируемого АВН в сеть реактивного тока $I_{среакт}$, можно определить на основе векторной диаграммы рис. 9.

После несложных преобразований можно получить соотношение между активным и реактивным током сети:

$$I_{среакт} = \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha}{\sin \alpha_1} I_{сакт}, \quad (2)$$

причем
$$I_{сакт} = \frac{U_1 \sin \alpha_1}{\cos \alpha \omega L}. \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3) $\cos \alpha$, равный U_1/U_2 , является постоянной величиной и определяется коэффициентом повышения выходного напряжения АВН, а $U_1 = U_{ном}$.

Выражение (2) показывает, как в режиме стабилизации выходного напряжения АВН меняется реактивный ток сети $I_{среакт}$ в функции изменения активного тока сети $I_{сакт}$ (тока нагрузки АВН).

При уменьшении активного тока сети $I_{сакт}$ по сравнению с номинальным током сети в режиме активного потребления $I_{сном}$, когда $\alpha_1 = \alpha$, реактивный ток сети $I_{среакт}$ увеличивается в соответствии с (2). При этом угол α_1 уменьшается от значения α , соответствующего только активному потреблению, до нуля в режиме, когда в сеть генерируется только реактивная энергия.

Обозначим отношение реактивного тока сети к активному k_1 . Из (2) следует, что

$$k_1 = \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha}{\sin \alpha_1}. \quad (4)$$

Графики зависимостей $k_1 = f(\alpha_1)$ для рассматриваемых $\alpha = 24,6^\circ$ и $\alpha = 70,5^\circ$ представлены на рис. 10. При этом в первом случае, соответствующем повышению выходного напряжения АВН в 1,1 раза, α_1 меняется от 0° до $24,6^\circ$, а во втором случае, соответствующем повышению АВН в 3 раза, α_1 меняется от 0° до $70,5^\circ$.

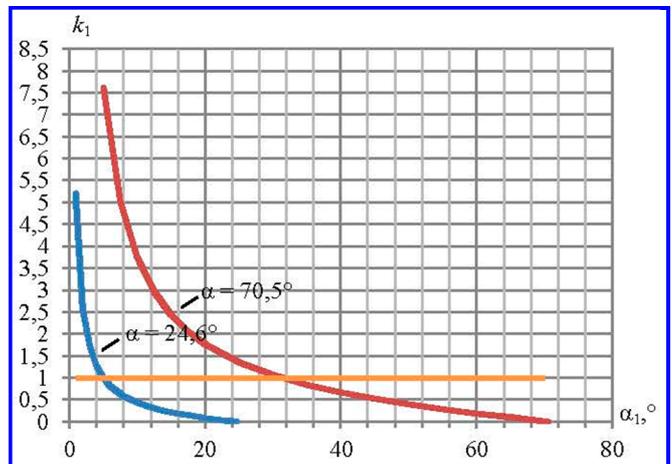
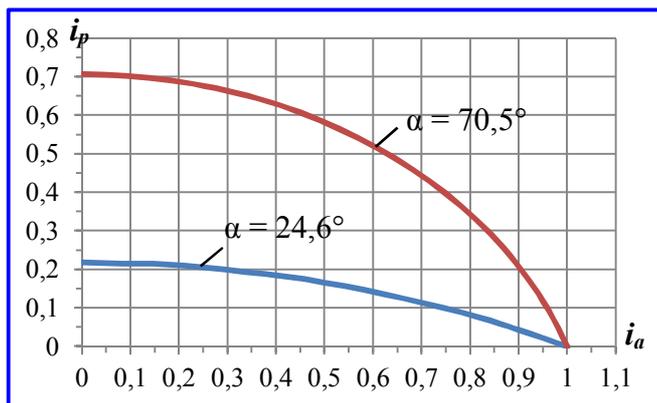


Рис. 10. Зависимости $k_1 = f(\alpha_1)$

Рис. 11. Зависимости $i_p = f(i_a)$

Рассмотрим диапазон α_1 и соответствующий ему диапазон нагрузок АВН, когда реактивный ток сети становится меньше активного, т. е. когда $k_1 < 1$. Из (4) следует, что в первом случае $k_1 < 1$, когда диапазон α_1 составляет $5^\circ < \alpha_1 < 24,6^\circ$, а во втором случае $k_1 < 1$, когда диапазон α_1 составляет $31,5^\circ < \alpha_1 < 70,5^\circ$.

Обозначив относительное значение активного тока сети $i_a = I_{\text{акт}}/I_{\text{сн}}$, где $I_{\text{сн}}$ соответствует значению α в режиме активного потребления (для первого случая $\alpha = 24,6^\circ$; для второго случая $\alpha = 70,5^\circ$) и учитывая, что в соответствии с (3) $i_a = \sin \alpha_1 / \sin \alpha$, получим, что диапазон изменения нагрузки АВН, когда реактивный ток сети меньше активного, составляет для первого случая 21 – 100 % от номинальной, а для второго случая 55 – 100 % от номинальной.

Обозначив относительное значение реактивного тока сети $i_p = \frac{I_{\text{с.реакт}}}{I_{\text{сн}}}$, после несложных преобразова-

ний получим, что $i_p = \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} = k_1 i_a$. Учитывая,

что $i_a = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha}$, задаваясь значениями α_1 , можно по-

лучить зависимости относительного значения реактивного тока i_p от относительного значения активного тока i_a (тока нагрузки АВН), которые для $\alpha = 24,6^\circ$ и $\alpha = 70,5^\circ$ представлены на рис. 11.

Полученные результаты вполне объяснимы, так как при малых коэффициентах повышения выходного напряжения АВН (например, 1,1) его характеристики приближаются к пассивному выпрямителю, в котором отсутствует генерация реактивного тока в сеть. Однако и при больших коэффициентах повышения выходного напряжения АВН (например, 3) генерация реактивного тока в сеть в рабочем диапазоне нагрузок АВН весьма незначительна и интен-

сивно падает до нуля при приближении нагрузки АВН к номинальной.

В режиме одновременной генерации в сеть активного и реактивного тока все соотношения аналогичны приведенным выше.

Из изложенного можно сделать вывод, что в режиме стабилизации выпрямленного напряжения возможности генерации реактивного тока в сеть активным выпрямителем напряжения весьма ограничены.

Литература

1. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург : УРО РАН, 2000. – 654 с.
2. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – Иваново : ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2008. – 298 с.
3. Применение активного выпрямителя в качестве энергосберегающего элемента в электроприводе / Г. С. Самарский, Д. Н. Мирошник // Труды Донецкого национального технологического университета «Автоматизация технологических объектов и процессов». – Донецк : ДонНТУ, 2004. – С. 267 – 270.
4. A novel method for force commutated cycloconverters using instantaneous values of input line-to-line voltages / A. Ishiguro, S. Okuma // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1991. – Vol. 38. – P. 166 – 172.
5. AC-DC-AC PWM converter with reduced energy storage in the DC link / L. Malesani, L. Rossetto, P. Tenti // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1995. – Vol. 31. – P. 287 – 292.
6. Indirect current control of a unity power factor sinusoidal current boost type three-phase rectifier / J. W. Dixon, B.-T. Ooi // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1988. – Vol. 35. – P. 508 – 515.
7. Релейное управление следящими преобразователями. Ч. 1. Структуры систем управления: анализ и синтез. / В. М. Аванесов // Электричество. – 2000. – № 10. – С. 45 – 53.
8. Микроэлектропривод постоянного тока с повышающим DC-DC преобразователем / Д. Я. Гринкевич, Г. М. Симак, А. В. Троицкий // Силовая электроника и энергоэффективность. Ч. 2. – 2003. – С. 92 – 97.
9. Исследования трехфазного активного выпрямителя напряжения / О. Г. Брылина, М. В. Гельман // Электротехнические системы и комплексы. – 2014. – № 1. – С. 47 – 50.
10. Векторное управление активным выпрямителем напряжения / М. Д. Козлов // Молодой ученый. – 2016. – № 9 (113). – С. 184 – 189.
11. Анализ работы активного выпрямителя напряжения в режимах компенсации реактивной мощности / А. С. Маклаков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – С. 43 – 50.

Поступила в редакцию 24.08.2020

Юрий Теодорович Портной, кандидат технических наук, доцент, главный специалист,
т. (495) 366-27-83, e-mail: otdel32@hq.vniiem.ru.
Азим Седрединович Абдурагимов, заместитель генерального директора,
т. (495) 365-25-45, e-mail: aas@hq.vniiem.ru.
Евгений Михайлович Выдумкин, начальник лаборатории,
т. (495) 366-22-10, e-mail: otdel32@hq.vniiem.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

ON LIMITING THE GENERATION OF REACTIVE CURRENT TO THE NETWORK BY AN ACTIVE VOLTAGE RECTIFIER

Iu. T. Portnoi, A. S. Abduragimov, E. M. Vydumkin

The article deals with the structures of Autonomous electric power systems using active voltage rectifiers. Vector diagrams of active voltage rectifiers are constructed when the output voltage is stabilized in the modes of active consumption, reactive power recovery, and simultaneous consumption of active power and reactive power recovery.

The ratio between the input currents of the active voltage rectifier in the modes of active consumption and reactive power recovery is obtained.

The limits of reactive power recovery are determined for the specified output values of the voltage and current of the active voltage rectifier.

Key words: active voltage rectifier, vector diagram, active consumption mode, active and reactive power recuperation mode.

References

1. Shreiner R. T. Mathematical modelling of AC electric drives with semi-conductor frequency converters / R. T. Shreiner // Yekaterinburg : Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2000. – 654 p.
2. Vinogradov A. B. Vector control of AC electric drives // Ivanovo : Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, 2008. – 298 p.
3. Samarskii G. S., Miroshnik D. N. Application of an active rectifier as a power-saving component in an electric drive // Proceedings of the Donetsk National Technical University 'Automation of industrial facilities and processes'. – DonNTU – 2004. – Pp. 267 – 270.
4. Ishiguro A., Okuma S. A novel method for force commutated cycloconverters using instantaneous values of input line-to-line voltages // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1991. – Vol. 38. – Pp. 166 – 172.
5. Malesani L., Rossetto L., Tenti P. AC-DC-AC PWM converter with reduced energy storage in the DC link // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1995. – Vol. 31. – Pp. 287 – 292.
6. Dixon J. W., Ooi B.-T. Indirect current control of a unity power factor sinusoidal current boost type three-phase rectifier // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1988. – Vol. 35. – Pp. 508 – 515.
7. Avanesov V. M. Relay control of tracking converters. Part 1 // Structures of control systems: analysis and synthesis. – Electricity. – 2000. – No. 10.
8. Grinkevich D. Ia., Simakov G. M., Troitskii A. V. Micro electric DC drive with a step-up DC-DC converter // Special issue. Power electronics and energy efficiency. Part 2. – 2003. – Pp. 92 – 97.
9. Brylina O. G., Gelman M. V. Study of a three-phase active voltage rectifier // Electrotechnical systems and complexes. – 2014.
10. Kozlov M. D. Vector control of an active voltage rectifier // Young Scientist. – 2016. – No. 9 (113). – Pp. 184 – 189.
11. Maklakov A. S. Analysis of operation of an active voltage rectifier in reactive power compensation modes // Machine building: scientific electronic journal. – 2013. – Pp. 43 – 50.

Iurii Teodorovich Portnoi, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.),
Associate Professor, Chief Specialist,
tel.: +7 (495) 366-27-83, e-mail: otdel32@hq.vniiem.ru.

Azim Sedredinovich Abduragimov, Deputy Director General, tel.: +7 (495) 365-25-45,
e-mail: aas@hq.vniiem.ru.

Evgenii Mikhailovich Vydumkin, Head of Laboratory, tel.: +7 (495) 366-22-10,
e-mail: otdel32@hq.vniiem.ru.
(JC «Corporation VNIIEМ»).