

adjustment characteristics for different deviations of the reference signals from their desired ratios ensuring a linear dependence between the torque and reference signal are given. It is shown that a linear dependence between the IM torque and the control signal U_Q can only be obtained at a certain rotor current variation frequency reference gain $K_\omega = K_{\omega lin}$, and it is shown how to control the electric drive proceeding from the pattern (convex or concave) of the characteristic $M_{IM} = f(U_Q)$. In addition, analytical dependences for an IM with any number of pole pairs p are considered, and the parameter variation ranges within which the no-load characteristic's nonlinearity due to saturation of the induction motor magnetic circuit may not be considered are indicated.

Key words: induction motor torque, frequency and current control, linearity of the torque versus reference signal dependence

REFERENCES

1. Brodovskii V.N., Ivanov E.S. *Privody s chastotnoy-tokovym upravleniyem* (Actuators with frequency-current control). Moscow, Publ. «Energiya», 1974, 169 p.
2. A.s. No. 193604 (RF). *Sposob upravleniya momentom asinkhronnogo dvigatelya* (Method for controlling the torque of an induction motor)/V.N. Brodovskii, E.S. Ivanov, M.I. Pyatkov, G.V. Tarasov. Bulletin of inventions, 1967, No. 7.
3. Sledyashchiye privody/Pod red. B.K. Chemodanova (Servodrives)/Edit. by B.K. Chemodanov. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2003, 878 p.

4. Petrov G.N. *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat, 1940, 663 p.

5. Brodovskii V.N., Ivanov E.S. *Izv. AN SSSR. Energetika i transport — in Russ. (News of the Academy of Sciences USSR. Energetics and Transport)*, 1971, No. 3, pp. 67–76.

6. Kopylov I.P. *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin, izd. 4-e* (Design of electrical machines, 4th publ.). Moscow, Publ. «Yurait», 2011, 767 p.

[25.01.2017]

Электричество, 2017, № 7, с. 55–59

DOI:10.24160/0013-5380-2017-7-55-59

Выпрямитель с «боковыми» пульсациями для вставок постоянного тока

КОПТЯЕВ Е.Н., БАЛАШЕВИЧ В.М., АБРАМОВ С.С.

Обзор современных систем электропередачи показывает, что наряду с линиями переменного тока в ряде ведущих стран мира используют высоковольтные вставки постоянного тока в качестве связующего звена между энергосистемами. Мощность вставок постоянного тока может достигать 8 ГВт (Китай), что обусловлено в ряде случаев более высокой рентабельностью передачи электроэнергии. В основе линий постоянного тока лежит использование тиристорных выпрямителей, качество которых зависит от числа фаз выпрямляемого напряжения и пульсаций на выходе. Основной схемой в случае высоковольтных вставок постоянного тока является двенадцатипульсная схема выпрямления с последовательным соединением трехфазных выпрямительных мостов. Она обеспечивает оптимальное соотношение качества выходного напряжения и габаритов, при этом для питания одного из выпрямительных мостов используется соединение вторичной обмотки в треугольник, что требует увеличения числа витков, а также массы и габаритов питающего трансформатора. Предлагаемый в статье вариант выпрямителя позволяет получить двенадцать пульсаций выходного напряжения, используя одинаковое соединение обеих вторичных обмоток — в звезду. Это дает ощутимую экономию активных материалов трансформатора и улучшает эргономические показатели при одновременном снижении себестоимости. Благодаря меньшему значению индуктивности фаз коммутируемой вторичной обмотки такое решение обладает лучшей электромагнитной совместимостью.

Ключевые слова: линия электропередачи, вставка постоянного тока, трансформатор, управляемый выпрямитель, пульсации, высшие гармоники токов, тиристор

Полупроводниковый выпрямитель — один из наиболее распространённых типов статических преобразователей электроэнергии. Трёхфазные мостовые выпрямители, нашедшие применение практически во всех областях промышленности, обеспечивают питание силовой нагрузки постоянного тока и цепей управления. Дальнейшее развитие преобразовательной техники и появление полностью управляемых ключей привели к созданию выпрямителей

с широтно-импульсным регулированием напряжения, а также с активной коррекцией коэффициента мощности. Изменилась область применения классических управляемых мостовых выпрямителей, которые используются преимущественно для питания промышленной нагрузки большой мощности, что объясняется низкой частотой коммутации вентилей и возможностью работы в режиме с естественной коммутацией тока. Одной из областей применения

таких выпрямителей являются вставки постоянного тока (ВПТ) для передачи энергии между энергосистемами регионов и стран.

Перспективы вставок постоянного тока. В нашей стране вставка постоянного тока используется для передачи электроэнергии в Финляндию (линия Ленинградская атомная электростанция – Выборг) в коммерческих целях, при этом дальнейшее расширение участия в европейском рынке электроэнергии считается перспективным [1]. Использование ВПТ было обусловлено, в частности, необходимостью обеспечения устойчивой параллельной работы двух энергосистем переменного тока в разных режимах с учетом различий в стандартах на допустимые отклонения частоты и напряжения. Использование ВПТ в этом случае оказалось экономически более выгодным, чем мероприятия по синхронизации работы двух энергосистем переменного тока.

Показательным является использование ВПТ в энергосистеме США, для которой характерно разделение на несколько регионов (Западный, Южный и Восточный, включая часть энергосистемы Канады), которые работают автономно друг от друга, а для связи используются ВПТ ограниченной мощности. Фрагментация энергосистемы затрудняла координацию надежной работы и стала причиной ряда тяжелых аварий в энергосистеме. Одним из направлений развития энергосистемы США признано внедрение мощных электропередач постоянного тока, которые могут объединить региональные энергосистемы и повысить надежность их работы в целом [2]. Использование ВПТ является основой проекта по созданию полноценной единой энергетической системы для обмена электроэнергией между регионами и обеспечению равномерной загрузки зон востока и запада континента, имеющих разные часовые пояса.

Ведутся работы по созданию линий электропередачи на постоянном токе высокого напряжения (UHVDC) в Китае, в том числе создание линии напряжением 800 кВ протяженностью 2210 км с рекордной пропускной способностью 8 ГВт. Всего в энергосистеме Китая насчитывается около 15 линий электропередач и ВПТ на весьма значительные мощности. Правительственная программа строительства линий UHVDC рассчитана до 2019 г. и включает строительство электропередачи постоянного тока Иркутск–Пекин протяженностью 2500 км [3]. Поставщиком комплектующих для этих проектов выступили фирмы ABB и Siemens – крупнейшие в мире производители высоковольтного оборудования для подобных проектов.

Выпрямитель с боковыми пульсациями. Обобщенная схема ВПТ между двумя энергосистемами

представлена на рис. 1, на котором питание ВПТ обеспечивается тиристорным выпрямителем с последовательным соединением трехфазных мостов, что обеспечивает необходимый 12-пульсный режим работы [4]. Для устранения высших гармоник тока и напряжения, генерируемых тиристорными преобразователями, применяются фильтрокомпенсирующие устройства значительной мощности. Необходимый фазовый сдвиг между напряжениями вторичных обмоток достигается использованием комбинации включения обмоток по схемам «звезда» и «треугольник», что дает симметричный сдвиг на 30° . Следует отметить следующую взаимосвязь: число пульсаций выпрямленного напряжения равно удвоенному числу фаз схемы. Поэтому с целью повышения качества выходного напряжения силовых выпрямителей необходимо увеличивать число фаз вторичной обмотки трансформаторов, что приводит к ухудшению массогабаритных показателей трансформатора и всей установки в целом [5, 6]. Предпринимались попытки дальнейшего развития технических характеристик силовых выпрямителей [7–9], в основном на базе известной схемы включения Скотта. Подобные решения были направлены главным образом на улучшение качества выходного напряжения путем увеличения числа пульсаций, однако приводили к ухудшению массогабаритных показателей установки в целом.

Известно, что использование схемы включения обмотки по схеме «треугольник» требует в $\sqrt{3}$ раз большего числа витков для получения такой же ЭДС, как и при включении по схеме «звезда» [12]. Это ведет к увеличению массы активных материалов трансформатора, в том числе просвета его магнитопровода и габаритов. Использование комбинаторных схем включения обмоток, например типа «зигзаг», также требует большего числа витков. В связи с этим наилучшей можно признать именно 12-пульсную схему выпрямления, обеспечивающую приемлемое качество выходного напряжения при минимальных габаритах. Дальнейшее увеличение пульсности ухудшает массогабаритные показатели, увеличивает стоимость установки [6].

Суммирование пульсаций трехфазных выпрямительных мостов возможно при параллельном

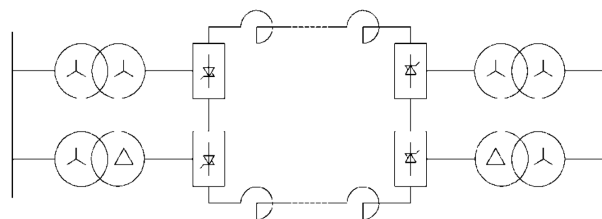


Рис. 1. Схема вставки постоянного тока между двумя энергосистемами

либо последовательном включении. Наиболее распространенным является параллельное включение, имеющее, однако, ряд слабых мест [10, 11]. Одно из них — необходимость в уравнительном реакторе для выравнивания нагрузки мостов. Последовательное включение лишено этого недостатка, поскольку значения тока в мостах одинаковы, а напряжения суммируются. Такая схема лучше всего подходит для вставок постоянного тока в объединенных энергосистемах.

Используемые в промышленных выпрямителях 12-пульсные схемы имеют равнозначные обмотки, и значения напряжения на выходах мостов совпадают. Необходимость фазового сдвига приводит к увеличению числа витков, и только в трансформаторах с вращающимся полем [5], оснащенных круговой обмоткой, возможно значительное увеличение числа пульсаций без ухудшения массогабаритных показателей трансформатора. Во всех остальных случаях необходимо использовать варианты включения обмоток трех фаз.

Развитие полупроводниковой техники и появление полностью управляемых тиристорных (ГТО, IGCT) позволяет улучшить эксплуатационные характеристики преобразователей, однако долгое время их применение сдерживалось из-за высокой стоимости. В настоящее время силовые полностью управляемые тиристоры типа IGCT выпускаются на рабочие напряжения до 6,5 кВ и предельные коммутлируемые токи до 3800 А. Анализ рыночной стоимости модулей показывает, что в диапазоне максимальных мощностей разница в стоимости обычных силовых тиристорных и IGCT-модулей со-

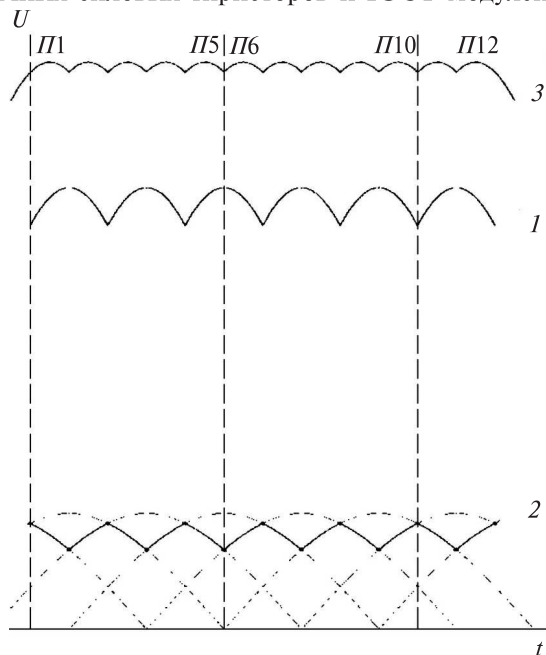


Рис. 2. График работы управляемого выпрямителя с боковыми пульсациями: 1 — неуправляемый мост; 2 — управляемый мост; 3 — выходное напряжение

ставляет уже не более 70%, а зачастую и гораздо меньше.

Авторами статьи разработан новый запатентованный [13] способ выпрямления, основанный на использовании последовательного включения выпрямительных мостов и алгоритма «боковых пульсаций», что позволило отказаться от сдвига фаз между вторичными обмотками. Один из трехфазных мостов выполняется на диодах, другой — на полностью или частично управляемых вентилях. Неуправляемый мост формирует выпрямленное напряжение, имеющее шесть пульсаций за период питающей сети. Это напряжение суммируется с напряжением на выходе управляемого трехфазного моста, в алгоритме управления которым реализуется принцип «боковых пульсаций». Принцип основан на использовании боковых частей фронта полуволн напряжения с формированием на выходе последовательности синусоидальных фрагментов, сдвинутых на угол 30° относительно пульсаций неуправляемого моста. Говоря иначе, дополнительный сдвиг реализуется программно с использованием кусочно-синусоидальной модуляции выходного напряжения при последовательном чередовании восходящих и спадающих фронтов напряжения. При суммировании двух напряжений суммарное напряжение имеет 12 полностью симметричных пульсаций, но только в случае соотношения числа витков двух обмоток, равного натуральному числу e (приблизительно 2,72). При других пропорциях формируются несимметричные выходные пульсации. Наглядно работа выпрямителя изображена на рис. 2, а последовательность алгоритма работы мостов приведена в таблице.

Технически это означает отказ от невыгодной по числу витков обмотки схемы типа «треугольник», что позволяет улучшить массогабаритные показатели установки, сохранив число пульсаций и качество выходного напряжения. Достижимый технический эффект при этом составляет 10% общей массы установки или до 20% массы силового трансформатора. В случае применения в мощных выпрямителях линий вставок постоянного тока может быть обеспечено значительное в абсолютных цифрах удешевление себестоимости и ощутимое снижение массогабаритных показателей.

В заключение отметим, что использование вставок постоянного тока позволяет повысить надежность совместного функционирования энергосистем, а в ряде случаев сократить затраты на введение линии в эксплуатацию. Основой передачи постоянного тока являются полупроводниковые преобразователи, выполненные по 12-пульсной схеме. Габариты таких установок определяются в основном размерами и массой силовых трансформа-

Номер пульсации	Интервал работы моста		Фазы
	неуправляемого	управляемого	
1	$0 \div \pi/3$	$0 \div \pi/6$	$ +AB + -CA $
2		$\pi/6 \div \pi/3$	$ +AB + -BC $
3	$\pi/3 \div 2\pi/3$	$\pi/3 \div 3\pi/6$	$ -BC + +AB $
4		$3\pi/6 \div 2\pi/3$	$ -BC + +CA $
5	$2\pi/3 \div \pi$	$2\pi/3 \div 5\pi/6$	$ +CA + -BC $
6		$5\pi/6 \div \pi$	$ +CA + -AB $
7	$\pi \div 4\pi/3$	$\pi \div 7\pi/6$	$ -AB + +CA $
8		$7\pi/6 \div 4\pi/3$	$ -AB + +BC $
9	$4\pi/3 \div 5\pi/3$	$4\pi/3 \div 3\pi/2$	$ +BC + -AB $
10		$3\pi/2 \div 5\pi/3$	$ +BC + -CA $
11	$5\pi/3 \div 2\pi$	$5\pi/3 \div 11\pi/6$	$ -CA + +BC $
12		$11\pi/6 \div 2\pi$	$ -CA + +AB $

торов, так что в случае предельных мощностей могут возникать трудности с транспортировкой трансформаторов к месту установки [12]. Предложенный в статье выпрямитель нового типа позволяет снизить расход обмоточного провода и трансформаторной стали, а значит уменьшить габариты установки при сохранении качества выходного напряжения.

Положенный в основу предлагаемого способа выпрямления метод суммирования представляет собой частный случай кусочно-синусоидальной модуляции. Последовательное включение мостов обеспечивает суммирование фрагментов синусоидальных напряжений вторичных обмоток силового трансформатора; мосты имеют специфичное соотношение числа витков, а именно — 1:2,72, что и формирует 12 симметричных пульсаций на выходе. Эффективность (с точки зрения массогабаритных показателей и использования витков обмотки трансформатора) обеспечивает алгоритм управления, при этом теряется лишь незначительная часть амплитудного значения вспомогательной обмотки (с меньшим числом витков), а отказ от включения обмотки по схеме «треугольник» дает снижение числа ее витков в 1,7 раза.

К недостаткам можно отнести ограниченный диапазон регулирования выходного напряжения, по крайней мере, без потери числа пульсаций. Он ограничен значением 25% номинального выходного напряжения, соответствующего режиму естественной коммутации вентиляей. Поскольку основная область применения предлагаемого выпрямителя — мощные промышленные установки в составе линий электропередачи постоянного тока, то данное ограничение не является существенным. Необходимость компенсировать падение напряжения при работе под нагрузкой и колебаниях в питающей сети переменного тока обуславливает использование управляемых вентиляей и регулирования угла их открытия, но требуемый диапазон при этом незначителен и не требует глубокого регулирования на-

пряжения на выходе выпрямителя. Использование в выпрямителе с боковыми пульсациями неуправляемого моста, по сути, снижает себестоимость установки — поскольку обеспечивает режим симметричных токов с применением вспомогательного управляемого моста. В обычных установках, как правило, используют одинаковые мосты с управляемыми вентиляями.

Использование полностью управляемых тиристоров IGBT становится стандартом, из чего можно сделать вывод, что увеличения производственных затрат не произойдет, а благодаря коммутации обмотки с малым числом витков установка имеет лучший гармонический состав потребляемых из питающей сети токов и лучшую электромагнитную совместимость за счет более низкой эмиссии помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеленохат Н.И., Шаров Ю.В. Комбинированное объединение больших энергосистем. — Электричество, 2006, № 5, с. 2–10.
2. Худяков В.В. Проблемы энергосистем США. — Электричество, 2006, № 6, с. 7–20.
3. Зотин О.И. В преддверии возрождения постоянного тока. Часть 1. — Силовая Электроника, 2013, № 4, с. 15–19.
4. Змиева К.А. Моделирование сети электроснабжения промышленного предприятия с использованием постоянного тока. — Электротехника, 2015, № 5, с. 2–8.
5. Черевко А.И., Дмитриев Б.Ф., Рябенский В.М., Музыка М.М., Солюянов П.В. Судовые полупроводниковые преобразователи: Учебник. — СПб.: Изд-во С. Петербургского государственного морского технического университета, 2011, 526 с.
6. Зиновьев Г.С. Силовая электроника. — М.: Изд-во Юрайт, 2012, 667 с.
7. Ворфоломеев Г.Н., Щуров Н.И., Мятаж С.В., Евдокимов С.А. Источник постоянного напряжения с шестнадцатикратной частотой пульсации. — Электротехника, 2003, № 9, с. 34–39.
8. Игольников Ю.С. 24-фазный выпрямитель. — Электротехника, 2004, № 10, с. 51–55.
9. Игольников Ю.С., Курганов А.А. Двенадцатипульсная схема выпрямителя на базе кольцевой схемы с уравнивающим реактором. — Электротехника, 2015, № 8, с. 2–6.
10. Анисимов Я.Ф. Гармоники неканонических порядков в трехфазной мостовой несимметричной схеме. — Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 1972, № 10, с. 1053–1058.

11. Арефьев А.Н., Севрюгов А.В., А.Н. Арефьев. Анализ переходных процессов в схеме с параллельным соединением мостовых преобразователей. — Электротехника, 1982, №2, с. 15–19.

12. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов.— М.: Альянс, 2013, 528 с.

13. Патент РФ № 144830. Двенадцатипульсный выпрямитель / С.С. Абрамов, Е.Н. Коптяев. — БИ, 2014, №25.

[09.01.2017]

А в т о р ы: Коптяев Евгений Николаевич окончил филиал Санкт-Петербургского государственного морского университета в 2002 г. по специальности «Системы электроэнергетики и автоматизации судов». Технический руководитель ПАО «Арктика», г. Северодвинск.

Балашевич Вячеслав Михайлович окончил в 1972 г. Новочеркасский политехнический институт по специальности «Автоматика и телемеханика». Ведущий инженер НИИ Энергетики ЮРГТУ (НПИ), г. Новочеркасск.

Абрамов Сергей Станиславович окончил в 1983 г. Ленинградский политехнический институт по специальности «Электрические системы». Защитил кандидатскую диссертацию «Разработка численного метода анализа режимов электрических машин, работающих в автономной электроэнергетической системе с обратным преобразователем». Ведущий инженер-конструктор ПАО «Силовые машины». Завод «Электросила», Санкт-Петербург.

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 6, pp. 55–59

DOI:10.24160/0013-5380-2017-7-55-59

A Rectifier with «Side» Ripple for Power System Applications

КОПТЯЕВ Evgenii N. (Public Company «Arktika», Severodvinsk, Russia) — Technical Test Manager

BALASHEVICH Vyacheslav M. (Scientific and Research Institute of Energy, South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia) — Leading engineer

ABRAMOV Sergey S. (Public Company «Power mashines. Works «Elektrosila», St. Petersburg, Russia) — Leading engineer-designer, Cand. Sci. (Eng.)

A review of modern electric power transmission systems shows that a number of advanced countries around the world use, along with AC power transmission lines, high-voltage (HV) back-to-back DC substations for interconnecting different power systems. The power capacity of HVDC back-to-back links may reach as high as 8 GW (China), which in a number of cases is governed by a higher profitability of the electric power transmission method. The HVDC power transmission systems are constructed on the basis of thyristor rectifiers, the performance quality of which depends on the number of rectified voltage phases and the output ripple. As a rule, HVDC back-to-back links use the 12-pulse rectifier scheme involving series-connected three-phase rectifier bridges. With this arrangement, it becomes possible to obtain the optimal ratio between the output voltage quality and converter dimensions. However, for supply in power to one of the bridges, one of the transformers shall have a delta connection diagram, which entails the need to use a power transformer containing a larger number of turns and having larger mass and dimensions. The article proposes a rectifier configuration that makes it possible to obtain the output voltage similar to that in the 12-pulse rectifier scheme while using the same star connection diagram of both secondary windings. As a result, a noticeable saving of transformer active materials is reached together with obtaining better ergonomic indicators and lower net cost. In addition, owing to lower inductance of the switched secondary winding phases, such a solution features better electromagnetic compatibility indicators.

Key words: power transmission line, HVDC back-to-back link, transformer, controlled rectifier, ripple, higher harmonic components of current, thyristor

REFERENCES

- Zelenokhat N.I., Sharov Yu.V. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2006, No. 5, pp. 2–10.
- Khudyakov V.V. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2006, No. 6, pp. 7–20.
- Zotin O.I. *Silovaya elektronika — in Russ. (Power Electrical Engineering)*, 2013, No. 4, pp. 15–19.
- Zmiyeva K.A. *Elektrotekhnika — in Russ. (Power Engineering)*, 2015, No. 5, pp. 2–8.
- Cherevko A.I., Dmitriyev B.F., Ryaben'kii V.M., Muzyka M.M., Soluyanov P.V. *Sudovye poluprovodnikovye preobrazovateli: Uchebnik (Ship semiconductor converters. Textbook)*. St. Petersburg, Publ. of the St. Petersburg State Sea Technical University, 2011, 526 p.
- Zinov'yev G.S. *Silovaya elektronika (Power electrical engineering)*. Moscow, Publ. «Yurait», 2012, 667 p.
- Vorfolomeyev G.N., Shchurov N.I., Myatezh S.V., Evdokimov S.A. *Elektrotekhnika — in Russ. (Power Engineering)*, 2003, No. 9, pp. 34–39.
- Igol'nikov Yu.S. *Elektrotekhnika — in Russ. (Power Engineering)*, 2004, No. 10, pp. 51–55.
- Igol'nikov Yu.S., Kurganov A.A. *Elektrotekhnika — in Russ. (Power Engineering)*, 2015, No. 8, pp. 2–6.
- Anisimov Ya.F. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika — in Russ. (News of Higher Education Institutions. Electromechanics)*, 1972, No. 10, pp. 1053–1058.
- Aref'yev A.N., Sevryugov A.V., Aref'yev A.N. *Elektrotekhnika — in Russ. (Power Engineering)*, 1982, No. 2, pp. 15–19.
- Tikhomirov P.M. *Raschet transformatorov (Calculating of the transformers)*. Moscow, Publ. «Al'yans», 2013, 528 p.
- Patent RF No. 144830. *Dvenadstatipul'snyi vypryamitel' (Twelve-Pulse Rectifier)/S.S. Abramov, E.N. Koptayev. Bulletin of inventions*, 2014, No. 25.

[09.01.2017]