

ПОСТОЯННЫЙ ТОК КАК ОСНОВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ БУДУЩЕГО

Э.А.-З. Джендубаев¹, А.-З.Р. Джендубаев²

¹ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Ставрополь, Россия

E-mail: tsaygeege@mail.ru

²ФГБОУ ВПО «Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия»

Черкесск, Россия

azr10@mail.ru

Аннотация

Известно, что система постоянного тока в некоторых областях постепенно вытесняет систему трехфазного переменного тока. Такая тенденция связана с развитием силовой электроники и снижением её стоимости. Это повышает конкурентоспособность энергосистемы постоянного тока и ведет к увеличению единичной мощности и количества явных и скрытых потребителей постоянного тока. К ним можно отнести электротранспорт, технологические процессы, источники питания различных устройств, электропривод с вентильным двигателем, светодиодные лампы и т.д. Причем самыми энергоемкими и массовыми в этом ряду в ближайшее время могут оказаться электромобили, что ускорит неизбежный переход электроэнергетики на «рельсы» постоянного тока.

Моделирование энергосистемы постоянного тока осуществлялось с помощью MATLAB®, Simulink® и SimPowerSystems®. Поскольку в энергосистеме постоянного тока нет необходимости регулировать реактивную мощность и поддерживать стабильной частоту, то в модели используется асинхронный генератор, подключенный к мостовому выпрямителю. Сравнительный анализ массогабаритных показателей силового трансформатора и силового преобразователя постоянного напряжения с промежуточным инвертором осуществлен на основе данных сварочного трансформатора и сварочного инвертора.

Разработана визуально-блочная модель энергосистемы постоянного тока. Разработана методика сравнительного анализа массогабаритных показателей инверторного преобразователя.

Разработанная модель может быть использована для исследования энергосистемы постоянного тока. Массогабаритные показатели инверторного преобразователя существенно меньше, чем у трансформатора.

Ключевые слова: энергосистема постоянного тока; моделирование; MATLAB®; Simulink®; SimPowerSystems®; асинхронный генератор; инвертор.

DIRECT CURRENT AS THE BASIS OF POWER ENGINEERING OF THE FUTURE

E.A.-Z. Dzhendubaev¹, A.-Z.R. Dzhendubaev²

¹North Caucasus Federal University

Stavropol, Russian Federation

ygeege@mail.ru

²North Caucasus State Humanitarian-Technological Academy

Cherkessk, Russian Federation

azr10@mail.ru

Abstract

It is known that the DC system in some areas gradually displaces the three-phase alternating current system. This trend is connected with the development of power electronics and a decrease in its cost. This increases the competitiveness of the DC power system and leads to an increase in the unit capacity and the number of overt and covert DC consumers. These include electric transport, technological processes, power supplies of various devices, electric drive with a valve motor, LED lamps, etc. And the most energy-intensive and mass in this range in the near future may be electric vehicles, which will accelerate the inevitable transition of the electric power industry to the "rails" of direct current.

Simulation of the DC power system was made using MATLAB®, Simulink® and SimPowerSystems®. Since there is no need to regulate the reactive power in the DC power system and maintain a stable frequency, the model uses an asynchronous generator connected to the bridge rectifier. A comparative analysis of the mass-size parameters of a power transformer and a DC-DC power converter with an inverter is based on the data of a welding transformer and a welding inverter.

A visually-block model of the DC power system was developed. A technique for comparative analysis of the mass-dimensional parameters of an inverter converter has been developed.

The developed model can be used to study the DC power system. The dimensions of the inverter converter are much smaller than those of the transformer.

Key-words: DC power system; modeling; MATLAB® Simulink®; SimPowerSystems®; asynchronous generator; inverter.

I. ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие силовой электроники, в частности создание мощных IGBT транзисторов, позволило существенно улучшить характеристики инверторов. Это, в свою очередь, привело к их широкому внедрению не только на промышленных предприятиях [1], в высоковольтной электроэнергетике [2], на железнодорожном и городском транспорте [3], но и в многочисленных устройствах относительно небольшой мощности, таких как электромобили, сварочные инверторные аппараты [4], стиральные машины [5] и т.д. Следует отметить и маломощные электроприемники постоянного тока, которые подключаются к сети переменного тока, такие как светодиодные лампы, вторичные источники питания компьютеров, телевизоров и иных бытовых устройств.

Таким образом, можно предположить, что повсеместное увеличение доли потребителей постоянного тока по сравнению с долей потребителей переменного тока, несомненно, повлечет за собой и изменения в структуре электроэнергетики, причем всех уровней напряжений. Уверенность в этом придают и известные планы некоторых ведущих европейских государств по массовой замене к 2030 г. обычных автомобилей на электромобили, в которых, как известно, также используются инверторы [6, 7].

II. СРАВНЕНИЕ УСТРОЙСТВ НА ПЕРЕМЕННОМ И ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

Для начала проведем сравнение сварочного трансформатора и сварочного инверторного аппарата с одинаковыми номинальными первичными напряжениями и сварочными токами. Некоторые данные этих устройств представлены в таблице I.

Таблица I. ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

Тип	Характеристики			
	Номинальный сварочный ток, А	ПВ %	Масса, кг	Габариты, мм
Сварочный трансформатор ТДМ-250	200	40	34	340 × 350 × 540
Сварочный инвертор Урал-206И	200	100	5,5	300 × 135 × 235

Из таблицы видим, что масса сварочного инвертора более чем в шесть раз, а габариты более чем в два раза меньше, чем у сварочного трансформатора.

К достоинствам сварочного инвертора следует также отнести более высокий КПД (0,85 против 0,6), возможность формирования внешних характеристик за счет различных обратных связей и наличие дополнительных функций, обеспечивающих более качественную сварку. Таким образом, сварочные инверторы имеют неоспоримые преимущества, которые им позволили полностью вытеснить сварочные трансформаторы с рынка.

Следует отметить и аналогичную картину в области вторичных источников питания. Там также источники (блоки питания) на базе трансформаторов были повсеместно вытеснены инверторными конструкциями.

Достаточно широкое распространение инверторы получили и в электроприводе.

С другой стороны, мы видим активное внедрение инверторов в системах высоковольтных линий электропередач на постоянном токе [8], а также в статических компенсаторах реактивной мощности.

Таким образом, сложилась парадоксальная ситуация, когда инверторные системы преобразования оказались эффективными на самом высоком и самом низком уровне напряжений, а вот на уровне 220-10 кВ – нет. Объясняется это дороговизной преобразователей, их уникальностью для каждой новой ЛЭП постоянного тока и значительными потерями в них по сравнению с ЛЭП переменного тока [8]. Интересно, кто-либо учитывал потери в выпрямителях вторичных источников питания, которых сотни миллионов, а в выпрямителях инверторных электроприводов, которых миллионы и т.д.? Вероятнее всего, что нет, поскольку эти потери на стороне потребителей, а не на стороне производителей.

В любом случае переход энергосистем на постоянный ток имеет определенные преимущества, часть из которых представлена ниже:

1. Отпадают проблемы, связанные со стабилизацией частоты сети и регулирования реактивной мощности, т.е. использования статических компенсаторов реактивной мощности, в которых также используются инверторы;
2. В качестве электромеханических преобразователей на электростанциях вместо синхронных машин можно использовать более эффективные бесконтактные электрические машины, например, асинхронные или индукторные;
3. Появляется возможность оптимизации режима работы электростанции путем изменения частоты

вращения электрического генератора и турбины свыше 3000 об/мин;

4. Отпадет необходимость в установке выпрямителей в электроприемниках постоянного тока, подключаемых к такой энергосистеме;
5. Повышается устойчивость энергосистем, ввиду отсутствия проблем, связанных с синхронизацией электрических машин;
6. Возрастает управляемость энергосистем, поскольку уменьшится количество параметров, которые необходимо регулировать;
7. Отпадет необходимость в выключателях на шинах за инвертором, поскольку он позволяет формировать любые внешние характеристики, как это уже имеет место в сварочных инверторных аппаратах, в которых при залипании электрода ток короткого замыкания резко ограничивается до оптимальных значений;
8. Достоинства инверторных подстанций постоянного тока потенциально могут способствовать более эффективному развитию технологии умных сетей.

Возможно не все предполагаемые достоинства, перечисленные выше, "доживут" до реализации, поскольку могут "пасть жертвой" своих недостатков, которые могут возникнуть в ходе моделирования таких сетей, а возможно, и на этапе их реализации. В любом случае, авторы уверены, что, благодаря инверторам, энергосистемы неизбежно перейдут на "рельсы" постоянного тока. Качественные изменения, связанные с инверторами, уже произошли в электродуговой сварке, электроприводе, вторичных источниках питания и продолжают происходить в более инерционных сферах деятельности человека с точки зрения темпов реализации идей. Что же касается электроэнергетики, то её инерционность на несколько порядков больше, поскольку для создания, например, сварочного инвертора, потребовалось несколько лет, а вот для создания энергосистем постоянного тока, возможно, потребуются

десятилетия. В любом случае, исследование таких сетей представляется авторам достаточно интересной и перспективной задачей.

Однако вернемся к сравнению устройств и проанализируем соотношения масс силового трансформатора и трансформатора инвертора без учета полупроводниковых элементов. В [4] имеется информация о том, что в 1982 г. для инверторного источника питания был создан трансформатор броневое типа мощностью 15 кВт ($ПВ = 100\%$) массой 1 кг. Для сравнения воспользуемся данными сухого трансформатора ТСГЛ-160/10/0,4 мощностью 160 кВА. Масса этого трансформатора составляет 800 кг. Следовательно, на один килограмм массы этого силового трансформатора приходится всего 0,2 кВА. Сделаем допущение, что удельная мощность трансформатора инверторной подстанции постоянного тока с ростом мощности не изменяется и равна 15 кВт/кг. Тогда мощность такого трансформатора с массой 800 кг составит 12 МВА, т.е. более чем в 75 раз больше, чем у трансформатора ТСГЛ-160/10/0,4.

Следует еще раз отметить, что основой большинства современных статических компенсаторов реактивной мощности (STATCOM) являются инверторы на базе IGBT транзисторов. В некоторых таких устройствах заимствуется технология, которая используется в системах высоковольтной передачи постоянного тока (HVDC) [9]. По всей видимости, возможен обратный процесс, когда технологии, опробованные в STATCOM, могут быть задействованы при реализации инверторных подстанций постоянного тока напряжением 35-10 кВ.

Далее рассмотрим вопросы, связанные с моделированием таких энергетических систем.

III. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рис. 1 представлена дискретная модель автономной энергосистемы, разработанная с помощью MATLAB, Simulink и SimPowerSystems Specialized Technology.

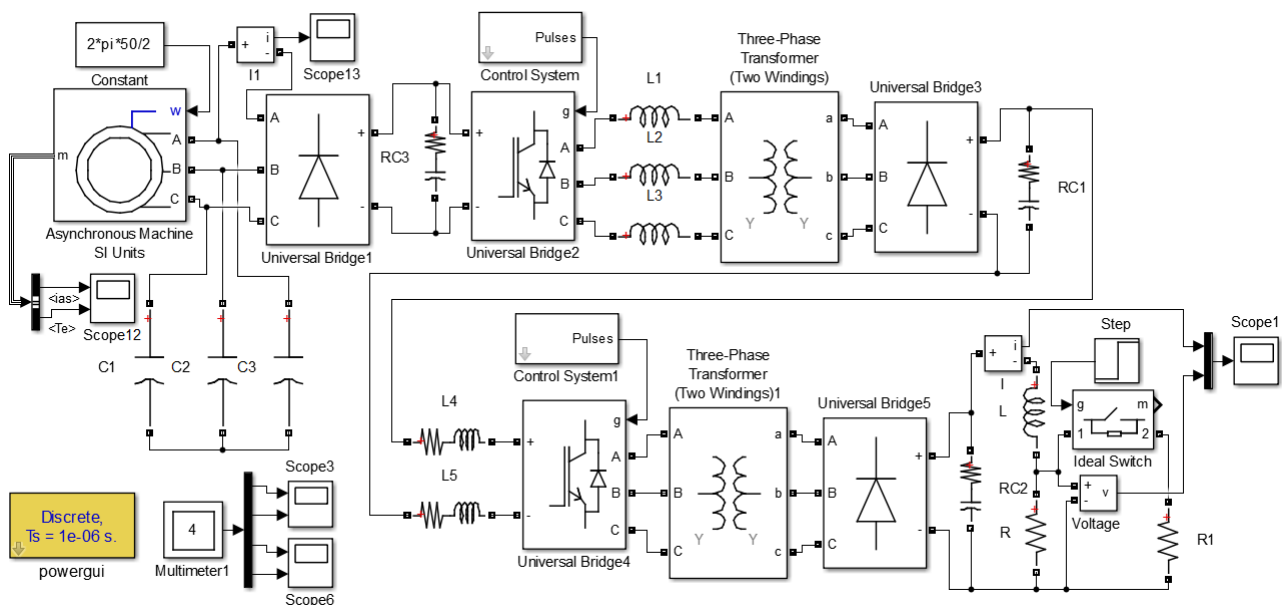


Рис. 1. Модель автономной энергосистемы постоянного тока

В качестве генератора в модели используется блок асинхронной машины со стандартными параметрами и учетом насыщения мощностью 160 кВт, которая выбрана в поле окна параметров. Скорость вращения ротора задана неизменной и равной синхронной. Для возбуждения используются конденсаторы емкостью 3500 мкФ на фазу.

В модели используются пять блоков Universal Bridge, два из которых работают в режиме инверторов, а три – в режиме трехфазных выпрямителей. В блоках управления инверторами заданы частота выходного напряжения 8000 Гц и несущая частота 8000 Гц. Также используются два блока трехфазных трансформаторов. В поле мощности и частоты окна параметров заданы 160000 (Вт) и 8000 (Гц), в поле напряжений повышающего трансформатора – 380 (В) и 10000 (В), в поле напряжений понижающего трансформатора – 10000 (В) и 380 (В). Сопротивления кабельной линии заданы в блоках L4 и L5. Моделируются конденсаторное самовозбуждение асинхронной машины при минимальной нагрузке и последующий наброс нагрузки.

На рис. 2 представлены кривые переменного линейного напряжения на входе и постоянного напряжения на выходе первого инвертора в функции времени. Кривые свидетельствуют о том, что асинхронная машина может возбуждаться при наличии в её цепи инверторов и трансформаторов. При использовании компьютера с процессором Intel i7 время расчета составило 35 мин.

На рис. 3 показаны кривые напряжения и тока нагрузки. Наброс нагрузки, как и следовало ожидать, приводит к снижению напряжения и росту тока.

Следует признать, что данная модель далека от совершенства, поскольку у авторов нет параметров реальных трансформаторов и инверторов, наличие которых позволило бы оценить адекватность модели. В любом случае она работоспособна и подтверждает возможность моделирования автономной энергосистемы постоянного тока без учёта обратных связей.

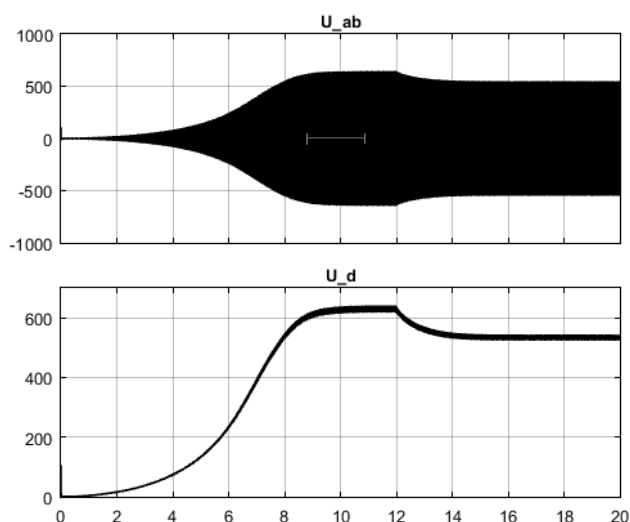


Рис. 2. Кривые переменного линейного напряжения на входе и постоянного напряжения на выходе первого инвертора

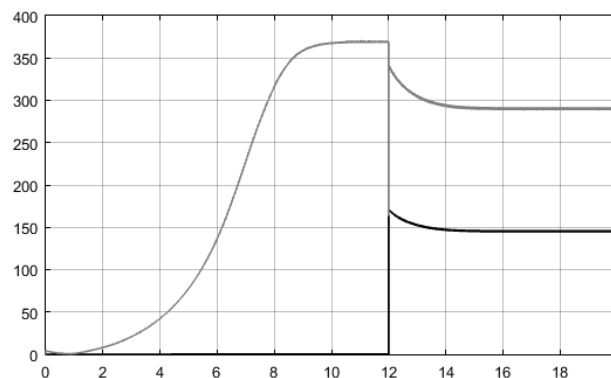


Рис. 3. Кривые напряжения и тока нагрузки

Список литературы

- [1] Змиева К.А. Моделирование сети электроснабжения промышленного предприятия с использованием постоянного тока // Электротехника. – 2015. – № 5. – С.2–9.
- [2] Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов / Ю.П. Рыжов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 488 с.
- [3] Хоменко Б.И., Сулова К.Н. Унифицированный преобразователь для электровозов постоянного и переменного тока // Электротехника. – 2009. – № 6. – С. 27–32.
- [4] Лебедев А.В. Транзисторные источники питания для электродуговой сварки (обзор) // Автоматическая сварка. – 2012. – № 9. – С.34–40.
- [5] Инвертор научился стирать. http://btest.ru/reviews/invertor_osvaivaet_stirku/
- [6] Европе предложили полностью отказаться от двигателей внутреннего сгорания с 2030 года. <https://nplus1.ru/news/2016/10/10/ban-ice>
- [7] В Нидерландах готовят законопроект о полном переходе на электромобили к 2025 году. http://elektrovesti.net/45581_v-niderlandakh-gotovyat-zakonoproekt-o-polnom-perekhode-na-elektromobili-k-2025-godu
- [8] Высоковольтная линия постоянного тока. <https://ru.wikipedia.org/wiki/>
- [9] Статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ) для энергетических компаний — SVC Light®. <http://new.abb.com/facts/ru/statkom-svc-light>