

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1053-1062

RESEARCH ELECTRICAL POWER SYSTEMS OF UNDERWATER COMPRESSOR STATION

I. V. Sorokin

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

The article contains an analysis of the two main options for the creation of electrical power systems of underwater compressor station with extended transmission line. The object of study is underwater compressor station capacity of 6 MW with high speed (13 000 rpm) centrifugal compressor. Electric drive contains synchronous electric machine and power converter.

The main objective of the article are to determine the feasibility of using electrical power systems with power converters for AC and DC transmission line variants. According to the results of research, the use of power converters is advisable in electrical power systems of underwater compressor station with DC transmission line due to high energy efficiency and low intensity of power loss growth with increasing cable length. Converter in this case consist of twelve-pulse rectifier on the shore and multi - level voltage source inverter, the number of levels, which depends on the power and voltage transmission. In system with AC transmission line total power consumed from network is increased by 1MVA and the loss of active power loss by 3.6%. At approximately equal voltage quality at the input of system, quality of the load voltage for the system with DC transmission line is significantly higher, which allows to reduce the dimensions of filtering devices. The main drawback of the DC line system is the high voltage levels of the inverter output voltage reducing reliability, complicating the structure of the inverter and requiring the use of high-voltage motors.

Keywords: power converter, underwater compressor station, DC transmission line, electric drive, electrical power system, voltage levels, multi-level inverter, twelve-pulse rectifier, high-voltage system, reliability.

For citation:

Sorokin, Iliya V. "Research electrical power systems of underwater compressor station." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 1053–1062. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1053-1062.

УДК 629.12.066.004.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОДВОДНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ

И. В. Сорокин

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлен анализ основных концептуальных вариантов построения электроэнергетических систем подводных компрессорных станций с протяженной линией электропередач. Объектом исследования является подводная компрессорная станция активной мощностью 6 МВт с высокоскоростным (13 000 об/мин) центробежным компрессором, находящаяся на расстоянии 35 км от берега. В качестве электропривода компрессора принимается система: преобразователь частоты – электродвигатель.

Основной задачей исследования являлось определение целесообразности использования электроэнергетических систем со статическими преобразователями частоты в двух основных вариантах кабельной линии — постоянного и переменного тока. Анализ показал, что применение статических преобразователей частоты оказывается целесообразным при внедрении их в структуры с линией передачи на постоянном токе благодаря высокой энергоэффективности и низкой интенсивности роста потерь с увеличением длины кабельной линии. Преобразователь в этом случае состоит из двенадцатимпульсной или береговой системы выпрямления и многоуровневого инвертора напряжения, число уровней которого зависит от напряжения в линии передач. В системе с линией на переменном токе полная мощность P , потребляемая из береговой сети, возрастает на 1 МВА, а потери активной мощности в системе по отношению к мощности установки — на 3,6 %. При сопоставимом качестве напряжения на входе сети для обеих систем качество напряжения на нагрузки для системы с линией постоянного тока существенно выше, что по-

звolyет снизить габариты выходных фильтров. Главным недостатком системы с линией постоянного тока являются высокие (свыше 6 кВ) уровни выходного напряжения инвертора, усложняющие структуру инвертора, снижающие общую безотказность системы, а также требующие применения высоковольтных электродвигателей.

Ключевые слова: преобразователь частоты, подводная компрессорная станция, линия постоянного тока, электропривод, уровень напряжения, электроэнергетическая система, многоуровневый инвертор, высоковольтная система, надежность, двенадцатипульсный выпрямитель.

Для цитирования:

Сорокин И. В. Исследование электроэнергетических систем подводной компрессорной станции / И. В. Сорокин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1053–1062. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1053-1062.

Введение (Introduction)

Особое значение в технологии добычи углеводородов, в частности для России, имеет тенденция создания подводных добычных комплексов (ПДК) для работы на труднодоступных морских месторождениях. Для эксплуатации ПДК, при отсутствии фонтанирования углеводорода (обеднение месторождения примерно на 30 %), требуется оборудование для создания необходимой разницы пластового и внешнего давления. С этой целью применяются компрессорные установки — агрегаты, основным элементом которых является нагнетатель газа и его привод. По принципу работы эти механизмы бывают поршневыми, центробежными и ротационными. Поршневые механизмы в большинстве своем работают на низких скоростях, а центробежные и ротационные — на средних и высоких скоростях. Наиболее широкое применение нашли центробежные компрессоры, поэтому с целью регулирования подачи путем изменения частоты вращения нагнетателя используются высокоскоростные регулируемые электроприводы, имеющие преимущества перед аналогичными приводами с двигателями внутреннего сгорания по КПД и масса-габаритным параметрам, что является одним из важнейших показателей привода при проектировании ПДК.

Использование электродвигателей для привода ПДК требует значительного повышения частоты питающего напряжения, так как скорость вращения центробежного компрессора достаточно высока (10–15 тыс. об/мин). В этом случае частота питающей сети для двигателя с минимальными числами пар полюсов (один или два) составит, соответственно:

$$f(2) = \frac{2(10^4 - 1,5 \cdot 10^4)}{60} = (333,33 - 500) \text{ Гц};$$

$$f(1) = \frac{(10^4 - 1,5 \cdot 10^4)}{60} = (166,5 - 250) \text{ Гц}.$$

Большое количество богатых арктических месторождений находится в большой удаленности от берега, такие как Штокмановское месторождение (500 км от берега), что влечет за собой создание сверхдлинных подводных кабельных трасс. Поэтому основными проблемами энергообеспечения ПДК является высокая мощность потерь в подводной кабельной линии при питании двигателя токами высоких частот из-за многократного увеличения реактивной составляющей сопротивления кабеля и вытеснения токов к поверхности кабеля с увеличением частоты (*скин-эффект*) и сложность конструкции подводных элементов системы.

Обзор литературы (Literature Review)

В рамках данной тематики проанализирован ряд обзорных статей [1]–[3] по энергообеспечению подводных компрессорных станций с использованием высоковольтных систем постоянного тока (HVDC), а также материалы источника [4], проработаны конкретные варианты проекта подводного компрессора мощностью 70 МВт с длиной кабельной линии 70 км. Рассмотрена структура преобразователя, состоящая из активного выпрямителя и автономного инвертора напряжения.

Рассмотрены особенности систем HVDC (структура полупроводниковых преобразователей, конструкция кабельных линий и уровни напряжений), выводы о целесообразности их применения при увеличении расстояния передачи приведены в [5]–[7], выполнены расчет и рассмотрение высокомоощных систем HVDC и HVAC сверхвысоких напряжений и расстояний [8], однако в указанных работах не выполнен сравнительный анализ данных систем с низкими уровнями напряжения и мощности при небольшой удаленности от берега.

Актуальность проблемы (Relevance of the Problem)

Объем прогнозируемых ресурсов природного газа России оценивается в 176 трлн м³, при этом доля морских месторождений составляет 35,2 %, однако основная масса (около 400) месторождений находится в труднодоступной Арктической зоне, что требует применения подводной технологии добычи. На данный момент применение ПДК является мировым трендом. Основными лидерами в этой области являются зарубежные компании: «Aker Solution» (Норвегия), «FMC Technologies» (США), «MAN» (Германия), «Siemens» (Германия), «ABB» (Финляндия), при этом полностью отсутствуют отечественные разработки. Исключительный размер нефтегазоносных акваторий России (4 млн км²) требует создания уникальных ПДК с учетом сверхвысоких расстояний (более 100 км) и тяжелых условий эксплуатации и обслуживания. Исследование работ по данной тематике позволяет сделать вывод об отсутствии детального анализа и сравнения различных вариантов построения электроэнергетических систем ПДК. Неизученной также остается динамика потерь в системах при росте мощности и длины кабельной линии системы.

Цели и задачи исследования (Aims and Objectives of the Study)

Целями исследования являются: создание вариантов систем HVDC и HVAC, их детальный анализ; создание рекомендаций по применению данных систем с учетом мощности и удаленности объекта; определение целесообразности использования статических преобразователей частоты в электроэнергетических системах ПДК; определение вида возможных структур систем HVDC и HVAC, их преимущества и недостатки.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве основного метода исследования выбран метод компьютерного моделирования. Исходные данные являются одинаковыми для линий постоянного и переменного тока.

Исходные данные. В качестве объекта исследования представлен ПДК со следующими техническими характеристиками (рассмотрен в эскизном проекте «Компрессор – ЭП»):

- удаленность от берега — 35 км;
- активная мощность установки — 6 МВт;
- коэффициент мощности нагрузки — 0,8;
- число оборотов компрессора — 13 000 об /мин;
- режим работы — продолжительный (S1).

В данном исследовании предлагаются к рассмотрению два основных варианта построения электроэнергетической системы ПДК: с кабельными линиями постоянного и переменного тока.

Электроэнергетическая система ПДК с линией постоянного тока. Одним из вариантов построения электроснабжения ПДК выступает система с линией электропередачи на постоянном токе (рис. 1). Два диодных выпрямителя совместно с двумя двухобмоточными трансформаторами формируют двенадцатипульсную схему выпрямления, находящуюся на берегу. Кабельные выводы линии подключаются к модулю многоуровневого инвертора (число уровней может меняться в зависимости от элементной базы) через мощный конденсаторный фильтр. Напряжение передачи на постоянном токе (12 кВ) выбрано исходя из максимальных возможностей современной полупроводниковой техники для представленной структуры. В соответствии со структурной схемой и показателями интенсивности отказов составим схему надежности (структура 1) с учетом возможного резервирования (см. рис. 1).

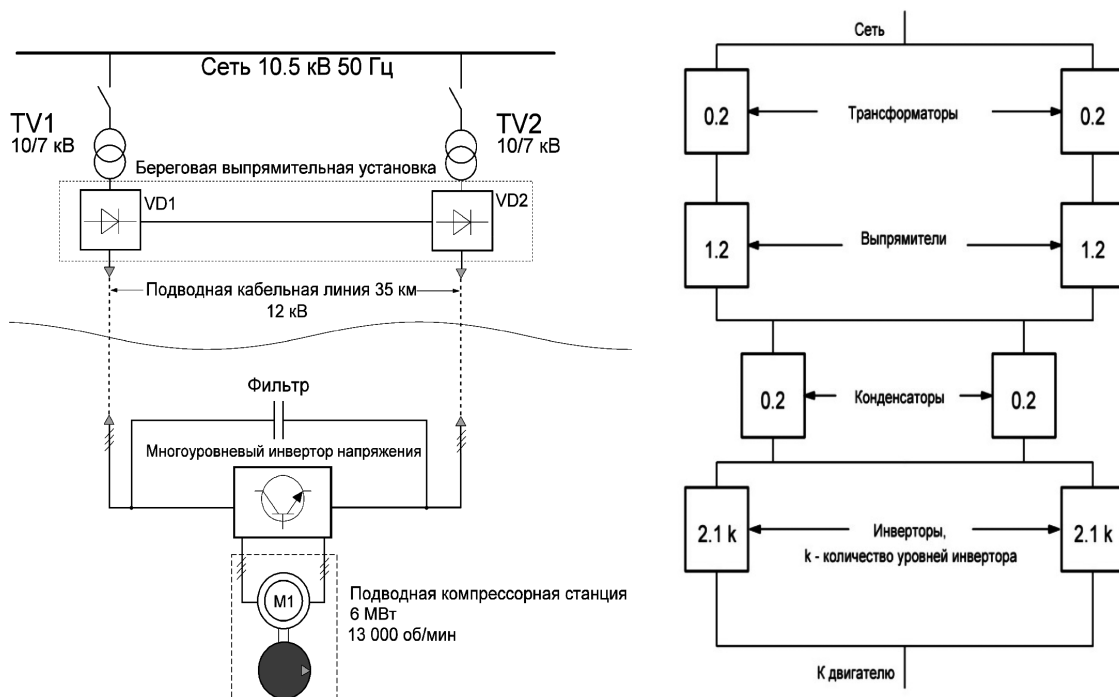


Рис. 1. Структурная схема электроэнергетической системы с электроприводом ПДК и силовой кабельной линией постоянного тока и ее схема надежности (структура 1)

Электроэнергетическая система ПДК с линией переменного тока. Альтернативная схема построения электроэнергетической системы ПДК (структура 2) представлена на рис. 2. Питание электродвигателя ПДК осуществляется от двух независимых преобразователей частоты, расположенных под водой вместе с согласующими трансформаторами $T3$ и $T4$. Надводные повышающие трансформаторы позволяют организовать высоковольтную (35 кВ) линию электропередачи переменного тока частотой 50 Гц. Структура преобразователя частоты — шестипульсный выпрямитель с двухуровневым автономным инвертором напряжения.

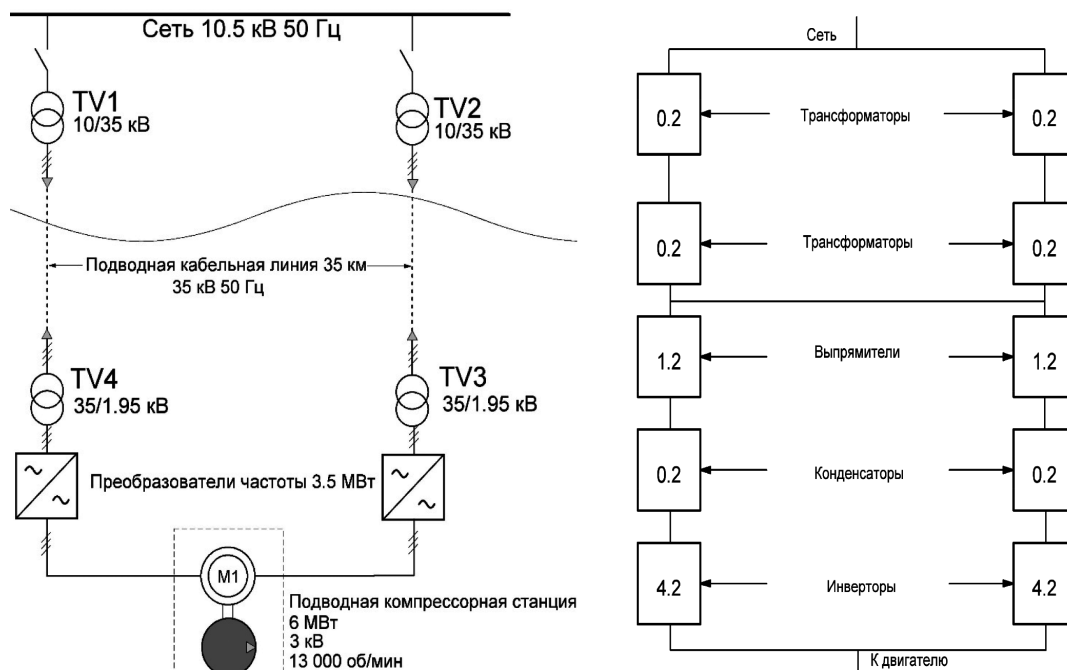


Рис. 2. Структурная схема электроэнергетической системы с электроприводом ПДК и силовой кабельной линией переменного тока и ее схема надежности (структура 2)

Результаты (Results)

Результаты моделирования представлены в виде графиков полной мощности, потребляемой из сети, коэффициента нелинейных искажений на входе / выходе системы и таблицы изменения величины потерь в зависимости от длины кабельной линии для обоих вариантов.

Моделирование структуры 1. На рис. 3 из графика переходного процесса по мощности, потребляемой из сети, видно, что пиковые значения мощности приходятся на включение установки и составляют около 11,8 МВ·А, а установившееся (нормальное) значение потребляемой мощности системы — около 6,7 МВ·А. Значения коэффициентов нелинейных искажений кривой напряжения на входе / выходе системы 8,6 % и 6 % соответственно (рис. 4).

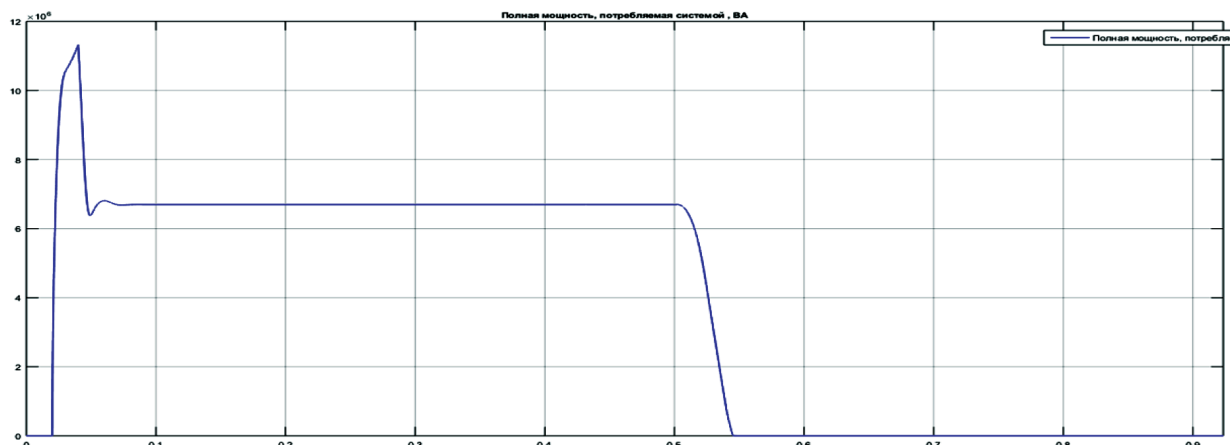


Рис. 3. График полной мощности, потребляемой установкой из сети при включении и отключении ($t = 0,5$ с) установки

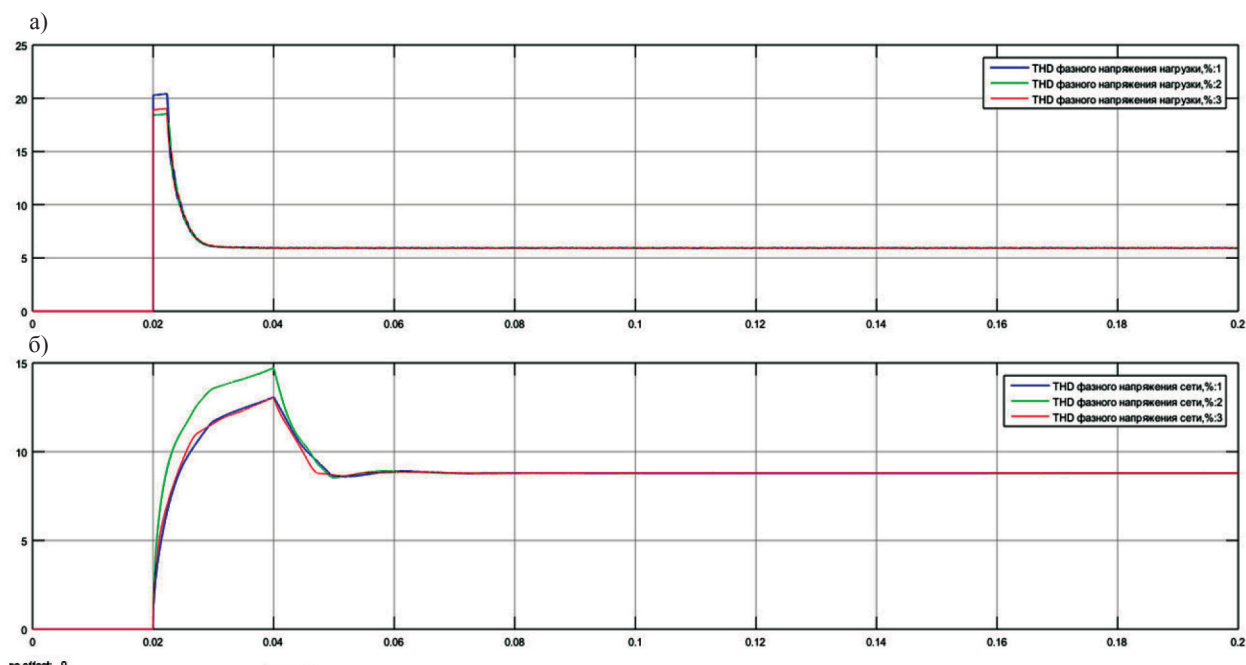


Рис. 4. Графики коэффициента нелинейных искажений (THD, %) кривых фазных напряжений нагрузки (а) и сети (б)

Активные потери мощности в системе приведены в табл. 1 для различных длин кабельной линии. При указанной структуре ЕЭЭС эти потери составили 3,6 % от полной активной мощности, потребляемой из сети.

Таблица 1

**Потери активной мощности и напряжения в системе
при различных длинах кабельной линии постоянного тока**

Длина кабельной линии, км	Потери активной мощности, %	Потери напряжения в кабельной линии, %
15	3	0,42
35	3,6	1,05
50	4,6	1,9
100	5,1	3,77
250	8,7	6,6
500	14,5	12,8

Моделирование структуры 2. Для данной структуры в качестве кабеля для подводной прокладки выбран кабель 2SX(FL)2XR11 20/35Кв фирмы «Nexans» со следующими характеристиками:

- удельная емкость кабеля — 0,17 мкФ/км;
- удельное сопротивление кабеля переменному току — 0,34 Ом/км;
- удельная индуктивность кабеля — 0,42 мГн.

Двигатель представлен активно-индуктивной нагрузкой.

На рис. 5 из графика переходного процесса по мощности, потребляемой из сети, видно, что пиковые значения мощности приходятся на включение установки и составляют около 13 МВ·А, а установившееся (нормальное) значение потребляемой мощности системы — около 8 МВ·А. Значения коэффициентов нелинейных искажений кривой напряжения на входе / выходе системы 6,5 % и 11 % соответственно (рис. 6).

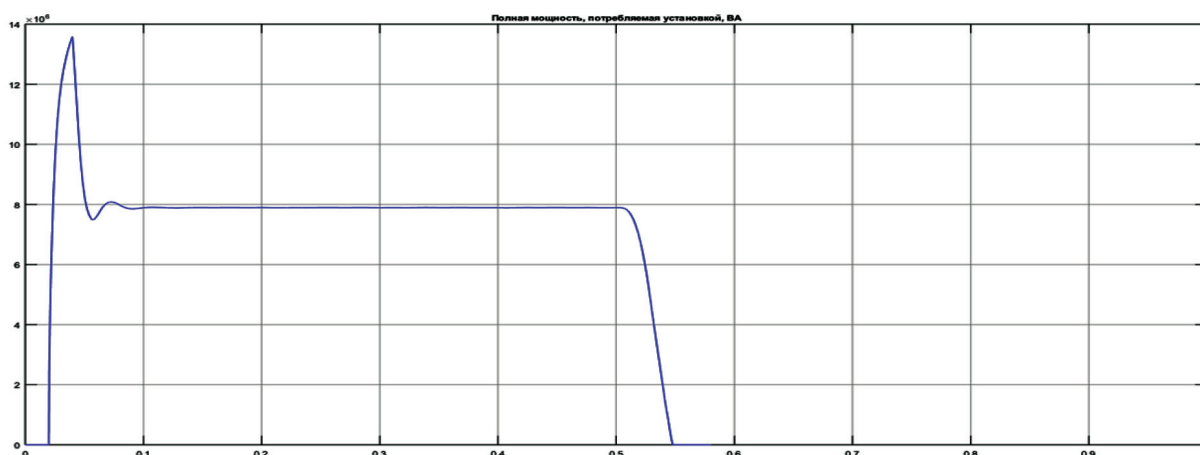


Рис. 5. График полной мощности, потребляемой установкой из сети при включении и отключении ($t = 0,5$ с) установки



б)

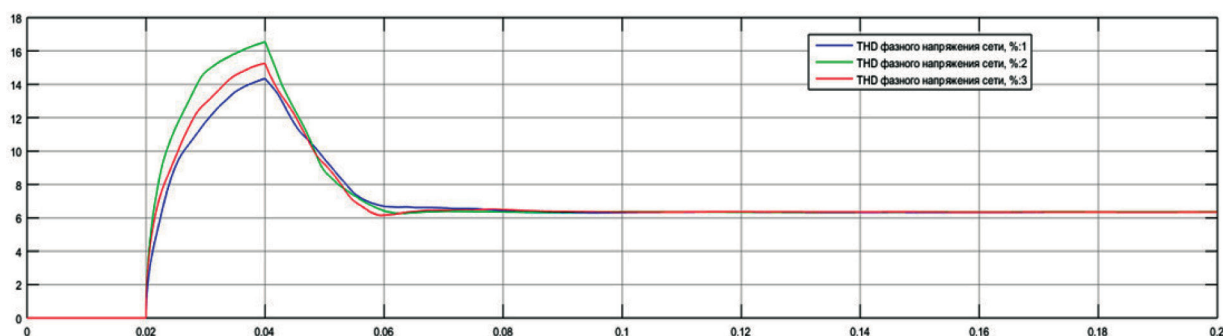


Рис. 6. Графики коэффициента нелинейных искажений (ТНД) кривых фазных напряжений нагрузки (а) и сети (б)

Активные потери мощности в системе отображены в табл. 2 для различных длин кабельной линии. При указанной структуре ЕЭЭС потери составили 8,5 % от полной активной мощности, потребляемой из сети. Динамика роста потерь с увеличением кабельной линии для ЕЭЭС с HVAC существенно выше согласно данным, приведенным в табл. 1 и 2.

Таблица 2

Потери активной мощности и напряжения в системе при различных длинах кабельной линии переменного тока

Длина кабельной линии, км	Потери активной мощности, %
15	5,3
35	8,5
50	13,2
100	58,2
250	61
500	78

Оценка надежности вариантов структурных схем. В рамках расчета надежности в связи со специфичностью системы рассматривался лишь критерий безотказности. При проведении анализа структур на надежность зададимся рядом следующих определений и допущений.

1. Работоспособность системы — мощность ПДК — не менее 2/3 от номинальной мощности, без снижения качества напряжения. Неспособность системы обеспечивать работоспособность является отказом системы.

2. Интенсивность отказов оборудования $\lambda(t)$ принимается постоянной, что является допустимым для элементов полупроводниковой техники и трансформаторов.

3. Элементы оборудования принимаются восстанавливаемыми. Расчет производится до первого отказа.

4. Обе системы рассматриваются с учетом двойного резервирования силового канала.

5. Отказами автоматов, аппаратов ручной коммутации и кабельной линии пренебрегаем.

Исходя из предложенных условий, составим расчетные схемы обоих вариантов с учетом резервирования. Структурные схемы вариантов 1 и 2 с указанием коэффициентов интенсивностей отказов отображены на рис. 1 и 2 соответственно. На основании представленных схем вычислим вероятность безотказной работы структур методом путей и сечений. Графики зависимости вероятности безотказной работы от времени (в годах) представлены на рис. 7, откуда видно, что вероятность безотказной работы для требуемого срока службы (25 лет) системы HVAC составит 0,9, а для системы HVDC — 0,6.

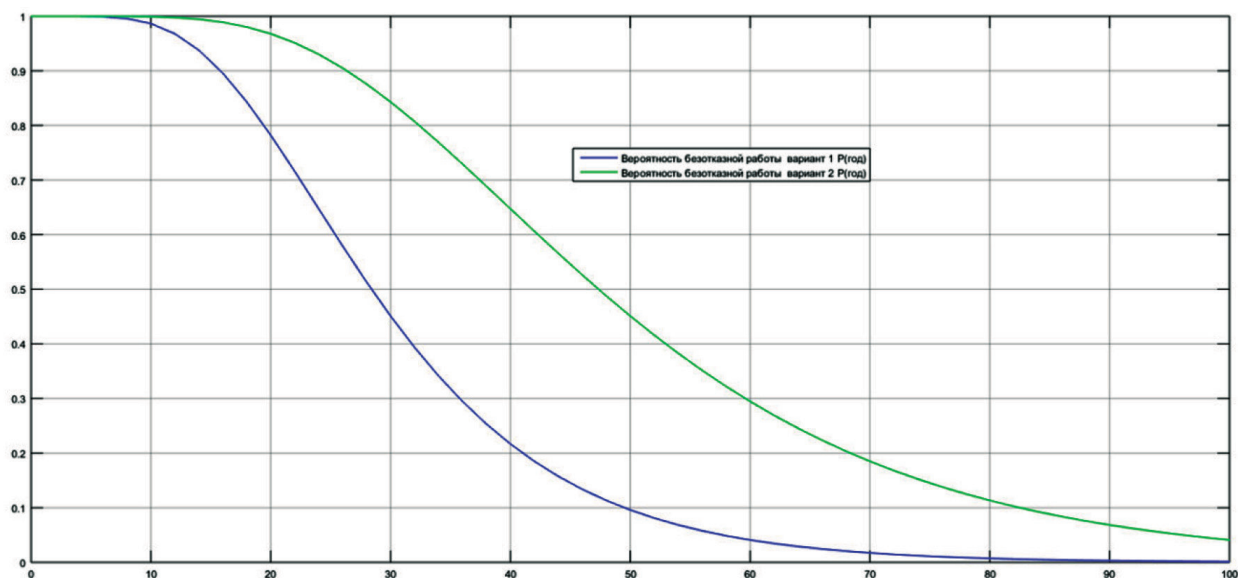


Рис. 7. Вероятности безотказной работы вариантов структур от времени эксплуатации

Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты свидетельствуют о более высоких показателях энергоэффективности систем HVDC (аналогично заявленному в [1] и [3]). Сравнительные характеристики линии переменного и постоянного тока являются адекватными. Показатели потерь в кабельной линии переменного тока соотносятся со справочными данными по кабелям фирмы «Nexans» без учета реактивной составляющей. Анализ потерь для каждой системы является индивидуальным с учетом уровней напряжения и мощности установки, поэтому сравнительный анализ с другими источниками некорректен.

Динамика активных потерь учитывает неизменный уровень мощности и напряжения для обоих вариантов, поэтому для протяженных (более 100 км) линий потери полной активной мощности достигали 78 % для HVAC и 14,5 % для HVDC, что показывает возможность использования данных уровней напряжения при передаче энергии с учетом допустимых потерь, однако структуры систем позволяют поднять уровень напряжения для минимизации уровня потерь.

Имеющиеся характеристики безотказности обеих систем указывают на основной источник отказов — преобразователь частоты. Усложнение конструкции за счет введения дополнительных полупроводниковых приборов приводит к существенному уменьшению вероятности безотказной работы системы.

Выводы (Summary)

При сравнительном анализе вариантов электроэнергетической системы (ЭЭС) ПДК с линиями передачи на переменном и постоянном токе рассмотрены параметры качества, энергоэффективности и надежности. Наибольшей энергоэффективностью обладает система HVDC тока за счет отсутствия реактивных потерь, как указано в [2]. Потери полной мощности в системе HVAC превышают аналогичные в системе HVDC не менее чем на 1 МВ×А. Объем потерь в системе HVDC по результатам расчетов сопоставимы с результатами, полученными в [9].

Влияние на питающую сеть, согласно рис. 4 и 6, сопоставимы для обеих систем, однако за счет многоуровневой системы преобразования структуры 1 качество выходного напряжения преобразователя выше, что положительно сказывается на надежности и долговечности приводного двигателя, однако качество напряжения на нагрузке для структуры 1 существенно выше, поэтому габариты фильтра для получения требуемого уровня THD для структуры 2 тоже будут существенно выше.

Целесообразность применения HVDC структуры для ЭЭС ПДК требует увеличения показателя безотказности системы, что может быть выполнено за счет дополнительного резервирования на уровне инвертора, создания многокаскадных многоуровневых схем с увеличенным запасом по мощности или снижения количества полупроводниковых ключей инвертора. Для согласования высоких уровней выходного напряжения требуется применение систем с высоковольтными электродвигателями по аналогии с [10]. Дальнейшее уменьшение потерь в системе HVDC достигается путем увеличения напряжения передачи и последующим увеличением уровней инвертора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chokhawala R. DC Transmission to Offshore Installations / R. Chokhawala, A. Mæland, T. F. Nestli // *The Journal of Offshore Technology*. — 2004. — Vol. 12. — Pp. 4–10.
2. Hörle N. Electrical supply for offshore installations made possible by use of VSC technology / N. Hörle, K. Eriksson, A. Maeland, T. Nestli // *Cigré 2002 Conference*. — Paris, France, 2002.
3. Laird B. Electrification of offshore platforms. Bellona Foundation report / B. Laird, M. Holm, F. Hauge. — 2007.
4. Nestli T. F. A Very High Power IGBT Based Variable Speed Drive: 40-MW, 60-kV Drive with 70-km Subsea DC Link. Offshore Applications from State of the Art to Future Trends / T. F. Nestli, T. Chr. Stensholt // *Proceedings of the international conference “Power electronics intelligent motion power quality” (PCIM Europe)*. — Nurnberg, Germany, 2004. — Vol. 2. — Pp. 11.
5. Asplund G. Electric power transmission to distant loads by HVDC Light / G. Asplund, K. Erikson, B. Drugge // *Distribution 2000 conference in Sydney, Australia*. — 2000.
6. Haileselassie T.M. Multi-terminal VSC-HVDC system for integration of offshore wind farms and green electrification of platforms in the North Sea / T. M. Haileselassie, M. Molinas, T. Undeland // *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE/2008)*. — Espoo, Finland: Helsinki University of Technology, 2008. — Vol. 8. — Pp. 8.
7. Lamell J. O. Offshore platform powered with new electrical motor drive system / J. O. Lamell, T. Trumbo, T. F. Nestli // *Petroleum and Chemical Industry Conference, 2005. Industry Applications Society 52nd Annual*. — IEEE, 2005. — Pp. 259–266. DOI: 10.1109/PCICON.2005.1524562.
8. Asplund G. A novel approach to providing on route power supplies to rural and urban communities in close proximity to the extra high voltage DC transmission line / G. Asplund, A. Williamson // *Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, 2007. PowerAfrica'07. IEEE*. — IEEE, 2007. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/PESAFR.2007.4498119.
9. Marvik J. I. Electrification of offshore petroleum installations with offshore wind integration / J. I. Marvik, E. V. Øyslebø, M. Korpås // *Renewable energy*. — 2013. — Vol. 50. — Pp. 558–564. DOI: 10.1016/j.renene.2012.07.010.
10. Hyttinen M. New application of voltage source converters (VSC) HVDC to be installed on the gas platform Troll A / M. Hyttinen, J.-O. Lamell, T. Nestli // *CIGRE*. — Paris, 2004.

REFERENCES

1. Chokhawala, R., Asmund Mæland, and Tom F. Nestli. “DC Transmission to Offshore Installations.” *The Journal of Offshore Technology* 12 (2004): 4–10.
2. Hörle, Nils, K. Eriksson, Asmund Mæland, and Tom F. Nestli. “Electrical supply for offshore installations made possible by use of VSC technology.” *Cigré 2002 Conference*. Paris, France, 2002.
3. Laird, B., M. Holm, and F. Hauge. *Electrification of offshore platforms. Bellona Foundation report*. 2007.
4. Nestli, T. F., and T. Chr. Stensholt. “A Very High Power IGBT Based Variable Speed Drive: 40-MW, 60-kV Drive with 70-km Subsea DC Link. Offshore Applications from State of the Art to Future Trends.” *Proceedings of the international conference “Power electronics intelligent motion power quality” (PCIM Europe)*. Vol. 2. Nurnberg, Germany, 2004. 11.
5. Asplund, Gunnar, Kjell Eriksson and Birger Drugge. “Electric power transmission to distant loads by HVDC Light.” *Distribution 2000 conference in Sydney, Australia*. 2000.

6. Haileselassie, Temesgen M., Marta Molinas and Tore Undeland. "Multi-Terminal VSC-HVDC System for Integration of Offshore Wind Farms and Green Electrification of Platforms in the North Sea." *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE/2008)*. Vol. 8. Espoo, Finland: Helsinki University of Technology, 2008. 8.

7. Lamell, Jan O., Timothy Trumbo, and Tom F. Nestli. "Offshore platform powered with new electrical motor drive system." *Petroleum and Chemical Industry Conference, 2005. Industry Applications Society 52nd Annual. IEEE*, 2005. DOI: 10.1109/PCICON.2005.1524562.

8. Asplund, Gunnar, and Andrew Williamson. "A novel approach to providing on route power supplies to rural and urban communities in close proximity to the extra high voltage DC transmission line." *Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, 2007. PowerAfrica'07. IEEE. IEEE*, 2007. DOI: 10.1109/PESAFR.2007.4498119.

9. Marvik, Jorun I., Eirik V. Øyslebø, and Magnus Korpås. "Electrification of offshore petroleum installations with offshore wind integration." *Renewable energy* 50 (2013): 558–564. DOI: 10.1016/j.renene.2012.07.010.

10. Hyttinen, Mats, Jan–Olof Lamell, and Tom F. Nestli. "New application of voltage source converters (VSC) HVDC to be installed on the gas platform Troll A." *CIGRE*. Paris, 2004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сорокин Илья Владимирович —
инженер
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»
196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Московское шоссе, 44
e-mail: iliya11111111@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sorokin, Iliya V. —
Engineer
Krylov State Research Centre
44 Moskovskoe shosse, St.Petesburg, 196158,
Russian Federation
e-mail: iliya11111111@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17 сентября 2018 г.

Received: September 17, 2018.