

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Б.Г. Булатов, М.Е. Гольдштейн, Н.В. Корбуков

Рассмотрены особенности включения математической модели длительных режимов ППТН в разработанную в среде Labview на кафедре ЭССиС программу расчета электрической сети. Программа позволяет задавать конфигурацию сети, сопротивления ЛЭП, мощности нагрузок и генерации, напряжение балансирующего узла и точность расчета. Проанализированы потери в сети в зависимости от загрузки ППТН, на примере послеаварийных режимов сети показаны положительные свойства ППТН в сравнении с передачей переменного тока. Показано, что применение ППТН расширяет возможности оптимизации режимов сети и позволяет повысить ее надежность в аварийных и послеаварийных режимах.

Особенность модели длительных режимов ППТН состоит в том, что векторы напряжений в узлах выпрямительной и инверторной подстанций не связаны жестко, а активная мощность линии регулируется независимо. В модели узлы связаны через потребление мощности в одном узле и генерацию во втором, причем характерно, что в длительных режимах контур постоянного тока ППТН описывается теми же уравнениями, что и ППТ на преобразователях тока с фазовым регулированием. Потери в преобразовательных трансформаторах и реакторах и преобразователях учтены в виде нагрузок в узлах соответствующих подстанций.

Векторная разность между напряжением выпрямительной подстанции и сетевым напряжением определяет величину и направление полной мощности передачи. То же справедливо и для инверторной подстанции по отношению к ее прилегающей энергосистеме. Предельно допустимая мощность передачи ограничивается наибольшим действующим значением тока преобразователя, который ограничен нормируемой токовой нагрузкой силовых полупроводниковых приборов.

Разработанная программа рассчитана на применение в учебных целях, а модель ППТН – для интеграции в промышленные программы расчета и оптимизации режимов энергосистем.

Ключевые слова: передача постоянного тока, преобразователь напряжения, длительные режимы сети, Labview.

Введение

В энергосистемах с передачами (ППТН) или вставками (ВПТН) постоянного тока на базе преобразователей напряжения расширяются возможности оптимизации режимов сети, но при этом требуется корректное моделирование ППТН в программах расчета длительных режимов. Известны работы по моделированию СТАТКОМ в программном комплексе (ПК) RastrWin3 [1] и ВПТН в ПК Eurostag [2]. Вторая работа анализирует переходные процессы ВПТН в тестовой схеме с двумя эквивалентными энергосистемами и промежуточными потребителями. В ней не рассматриваются особенности моделирования и функции ВПТН в программах расчета рабочих режимов сети. Поэтому задача моделирования ППТН в программах расчета длительных режимов энергосистемы является актуальной.

Математическая модель ППТН

Особенность модели длительных режимов ППТН состоит в том, что векторы напряжений в узлах выпрямительной и инверторной подстанций не связаны жестко, а активная мощность линии регулируется независимо. Поэтому в модели узлы связаны косвенно – через потребление мощности в

одном узле и генерацию во втором, причем характерно, что в длительных режимах контур постоянного тока ППТН описывается теми же уравнениями, что и ППТ на преобразователях тока с фазовым регулированием [3, 4]:

$$\begin{cases} U_d^B = U_d^H + I_d R_l; \\ P_d^B = U_d^B I_d; \\ P_d^H = U_d^H I_d; \\ P_B = \frac{U_S^B U_{пн}^B}{x_{\Sigma B}} \sin \delta_B; \\ P_H = \frac{U_S^H U_{пн}^H}{x_{\Sigma H}} \sin \delta_H. \end{cases} \quad (1)$$

При записи уравнений (1) потери в преобразовательных трансформаторах и реакторах и преобразователях учтены в виде нагрузок в узлах соответствующих подстанций, поэтому мощность, поступающая на выпрямительную подстанцию P_B равна мощности P_d^B после выпрямления, как и мощности P_H, P_d^H . Разница мощностей P_d^B и P_d^H обусловлена потерями в линии постоянного тока. Постоянные напряжения на подстанциях U_d^B и U_d^H отличаются величиной падения напряжения на линии. Векторная разность между напряжением выпрямительной подстанции $U_{пн}^B$ и сетевым напряжением U_S^B (с фазовым сдвигом δ_B) на индуктивных трансформатора и реактора $x_{\Sigma B}$ определяет

Электроэнергетика

величину и направление полной мощности передачи. То же справедливо и для инверторной подстанции по отношению к ее прилегающей энергосистеме.

Учтем потери электроэнергии на преобразовательных подстанциях и введем рассмотренные ранее [5] ограничения режимов работы передачи. Наибольшее допустимое напряжение передачи определяется ограничением по напряжению преобразователей (2). При этом наибольшее напряжение на преобразователях появляется при коэффициенте широтно-импульсной модуляции $k_m = 1$.

$$U_{\text{пн}}^{\text{н}} = k_m^{\text{н}} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} U_d^{\text{н}} \quad (2)$$

Предельно допустимая мощность передачи ограничивается наибольшим действующим значением тока преобразователя (3), который при неизменном коэффициенте модуляции зависит от активной и реактивной составляющих полного тока фазы на входе преобразователя и ограничен нормируемой токовой нагрузкой силовых полупроводниковых приборов:

$$I^{\text{н}} = \frac{\sqrt{(P_d^{\text{н}})^2 + (0,5P_d^{\text{н}})^2}}{\sqrt{3} \cdot k_m^{\text{н}} (\sqrt{3}/\sqrt{2}) U_d^{\text{н}}} \quad (3)$$

Эти ограничения позволяют определить соответствие заданным режимам передачи диапазонов уставок для регуляторов активной, реактивной мощностей и напряжений преобразователей.

Апробация модели и некоторые исследования

При опробовании математической модели ППТН она была интегрирована в программу расчета сети, разработанную в среде Labview на кафедре ЭССиС ЮУрГУ (рис. 1, 2). Программа позволяет задавать конфигурацию сети, сопротивления ЛЭП, мощности нагрузок и генерации, напряжения балансирующего узла и точность расчета. На экране в результате расчета выводятся полные мощности ЛЭП, напряжения на подстанциях и суммарные потери в сети. Передача постоянного тока соединяет узлы 3 и 4, при этом, если какой-либо из двух выключателей по краям передачи находится в выключенном положении, то перетока мощности по передаче нет, а преобразователь, подключенный к сети, работает в режиме СТАТКОМ и может регулировать реактивную мощность в узле.

В правой части экрана (см. рис. 2) расположено окно с исходными параметрами ППТН: сопротивлениями трансформаторов, реакторов, линии постоянного тока, выпрямленным напряжением, наибольшей полной мощностью передачи и квадратичной функцией потерь. Полные потери в ППТН нелинейно зависят от мощности и складываются из потерь в трансформаторах, реакторах, а также потерь в вентильях, как коммутационных, так и на интервале проводимости. Эта зависимость

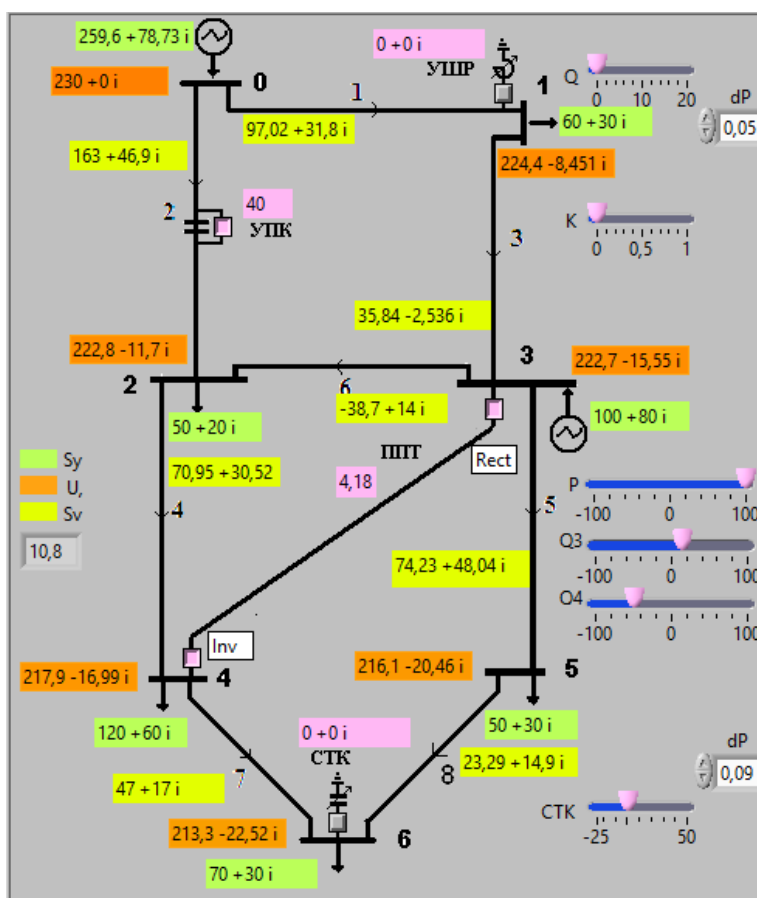


Рис. 1. Электрическая сеть в программе Labview



Рис. 2. Исходные данные в программе Labview

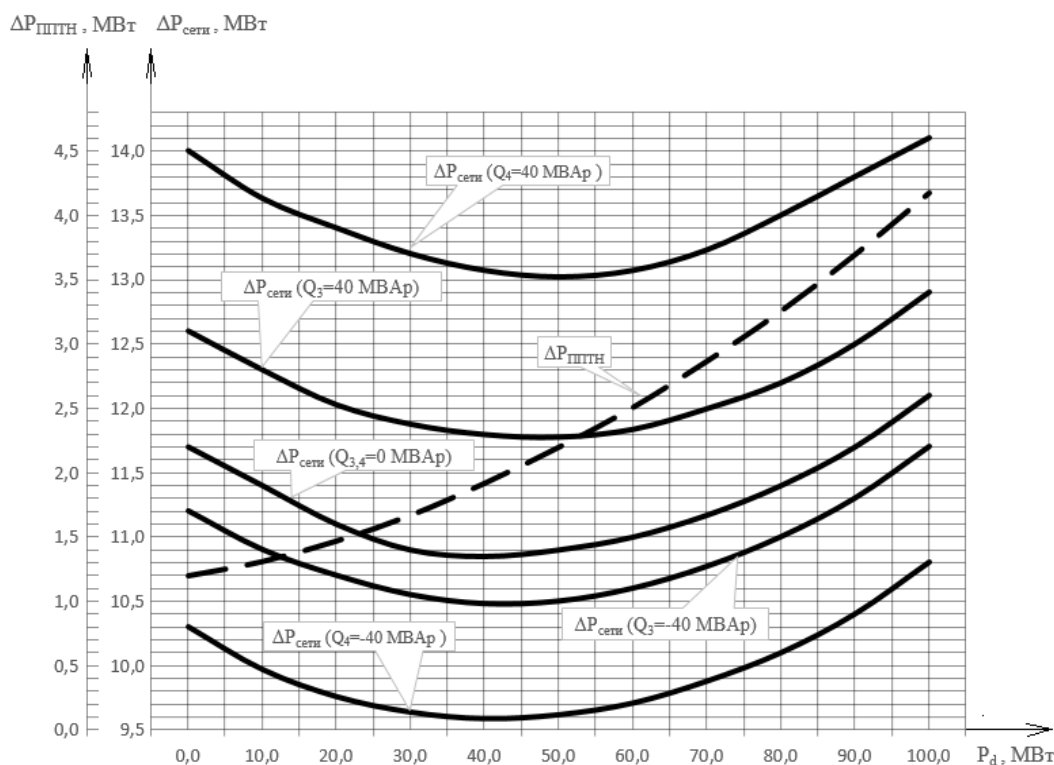


Рис. 3. Функция потерь ППТН и потерь в сети от активной мощности ППТН

представлена в модели в виде функции, аппроксимирующей данные испытаний передачи Cross Sound Cable [6] (рис. 3):

$$\Delta P(P_d) = 0,0002P_d^2 + 0,01P_d + 1,2. \quad (4)$$

Из этого выражения видно, что при увеличении активной мощности передачи от 0 до номинальной потери в ней растут от 1,2 до 4,2 % (при этом базовой мощностью принята номинальная).

Загрузка линий и напряжения в послеаварийных режимах

	S ₄ ,MBA	S ₅ ,MBA	S ₆ ,MBA	S ₇ ,MBA	S ₈ ,MBA	S ₃₄ ,MBA	U ₂ ,кВ	U ₃ ,кВ	U ₄ ,кВ	U ₅ ,кВ	U ₆ ,кВ
Нормальный режим без 3-4	139+j74	107+j65	16+j20	16+j4	55+j28	0	219,3	221,6	208,2	212,5	206,8
Вкл. ЛЭП №9	80+j36	79+j44	-30-j6	43+j21	28+j12	84	221,0	219,7	215,6	213,5	211,3
Вкл. ППТН	71+j22	74+j55	-39+j49	47+j10	24+j22	100	226,6	229,8	222,7	223,1	219,8
Откл.ЛЭП №4 (1 цепь)	120+j70	129+j80	-1+j9	-5-j6	76+j41	0	219,2	220,0	200,7	209,4	201,9
Откл.ЛЭП №4,вкл.ЛЭП №9	56+j26	82+j46	-50-j16	39+j19	31+j13	105	221,1	218,4	213,5	212,0	209,4
Откл.ЛЭП №4, вкл.ППТН	60+j20	86+j59	-48+j46	36+j7	34+j25	100	226,4	229,2	220,1	221,8	217,9
Откл.ЛЭП №5	259+j187		106+j83	126+j82	-50-j30	0	213,8	223,9	190,0	165,6	172,5
Откл.ЛЭП №5,вкл.ЛЭП №9	101+j51		-15+j1	124+j77	-51-j32	146	219,5	219,0	211,6	190,6	196,6
Откл.ЛЭП №5, вкл.ППТН	152+j101		24+j97	124+j77	-50-j30	100	223,0	231,9	209,2	184,9	191,9
Откл.ЛЭП №6	131+j64	115+j75		8-j4	63+j37	0	218,6	225,6	209,3	216,0	209,6
Откл.ЛЭП №6,вкл.ЛЭП №9	103+j41	76+j44		46+j21	25+j11	65	221,3	218,5	214,9	212,5	210,3
Откл.ЛЭП №6, вкл.ППТН	88+j4	58+j77		64-j10	7+j44	100	224,5	233,2	221,5	224,9	219,8
Откл.ЛЭП №7	122+j68	124+j72	3+j15		71+j34	0	219,8	221,2	210,4	211,5	205,2
Откл.ЛЭП №7,вкл.ЛЭП №9	70+j32	124+j72	-39-j13		71+j34	51	220,8	218,7	216,1	208,9	202,4
Откл.ЛЭП №7, вкл.ППТН	23+j11	123+j71	-78+j36		71+j33	100	226,2	226,6	224,5	216,4	209,2
Откл.ЛЭП №8	198+j117	50+j31	63+j50	71+j35		0	217,9	224,0	202,3	219,9	194,6
Откл.ЛЭП №8,вкл.ЛЭП №9	88+j40	50+j31	-24-j3	71+j34		106	220,8	219,8	214,8	215,6	207,6
Откл.ЛЭП №8, вкл.ППТН	95+j49	50+j31	-19+j68	71+j34		100	225,4	230,5	218,0	226,2	210,1

Общие потери в сети переменного тока включают и потери в ППТН. Поэтому, несмотря на более низкие потери в линии в сравнении с ЛЭП на переменном токе, потери в сети с существенно недогруженной ППТН получаются выше, чем без нее. Так, в режиме с выведенной ППТН суммарные потери в сети составляют 10,5 МВт, а с работающей ППТН от 10,9 до 12,1 МВт. Характерно, что минимум потерь в сети в независимости от реактивных мощностей преобразователей достигается при загрузке ППТН до 40–50 % от номинальной мощности (см. рис. 3).

Несмотря на то, что в рассматриваемой сети в рабочих режимах применение ППТН не приводит к снижению потерь, ее особые свойства позволяют повысить надежность работы сети в аварийных и послеаварийных режимах и снизить ущерб от недоотпуска электроэнергии. В таблице приведены результаты расчета нескольких послеаварийных режимов сети, возникающих при отключениях линий 4, 5, 6, 7, 8. Отключению каждой из линий соответствует три режима: без связи узлов 3–4, с передачей переменного тока (ЛЭП 9 между узлами 3 и 4) и с ППТН (между узлами 3 и 4).

Так как в нормальном режиме напряжения в узлах оказались ниже нормируемых, и следовательно, в послеаварийных режимах напряжения будут

еще ниже, то для увеличения напряжений в узлах сети уставки для режимных параметров ППТН зададим максимальными по генерации реактивных мощностей, но с учетом базовых ограничений: $P_d^B = 100$ МВт, $Q^B = 50$ МВАр, $Q^H = 50$ МВАр. Во всех послеаварийных режимах с ППТН ее активная мощность неизменна и равна 100 МВт, в то время как линия переменного тока 9 в режимах с выведенными линиями 6 и 7 недогружена, а в режимах с отключенной ЛЭП № 5 перегружена. В первом случае это говорит о недостаточной эффективности передачи, во втором – о риске отключения ее защитой. Примечательно также, что только в режиме без ЛЭП № 5 напряжения в узлах сети выше в вариантах с линией переменного тока. Во всех остальных режимах применение ППТН обеспечивает значительно более высокие уровни напряжения за счет генерации реактивной мощности на преобразовательных подстанциях в узлах 3 и 4.

Заключение

Рассмотрены особенности включения математической модели длительных режимов ППТН в программу расчета 7-узловой сети 220 кВ. На основе анализа нормальных и послеаварийных рабочих режимов сети показана адекватность модели для интеграции в программы расчета режимов сети.

Проведено сравнение включения передачи переменного тока и ППТН в послеаварийных режимах. Разработанная программа рассчитана на применение в учебных целях, а модель ППТН – для интеграции в промышленные программы расчета и оптимизации режимов энергосистем.

Литература

1. Моделирование устройств FACTS в задачах расчета и оптимизации режимов энергосистем / П.М. Ерохин, В.Г. Неуймин, А.С. Александров, Д.М. Максименко // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2012. – № 66. – С. 22–28.

2. Моделирование вставки постоянного тока на преобразователях напряжения в среде ПВК «EUROSTAG» / А.С. Герасимов, Е.В. Ефимова, А.В. Коробков, В.А. Шлайфштейн // Известия НИИ постоянного тока. – 2010. – № 64. – С. 225–236.

3. Гольдштейн, М.Е. Универсальная математическая модель системы с вентильными асин-

хронными связями / М.Е. Гольдштейн, К.Ю. Филяев // Электричество. – 2008. – № 6. – С. 12–18.

4. Гольдштейн, М.Е. Математическая модель длительных режимов передачи постоянного тока на базе преобразователя напряжения / М.Е. Гольдштейн, Н.В. Корбуков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – № 37. – С. 126–128.

5. Гольдштейн, М.Е. Допустимые длительные режимы передачи постоянного тока на базе преобразователя напряжения / Н.В. Корбуков, М.Е. Гольдштейн // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. IV междунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 14–18 окт. 2013 г. / Мин-во образования и науки РФ, Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. – Новочеркасск: Лик, 2013. – Т. 1. – С. 148–151.

6. Van Eeckhout, B. The economic value of VSC HVDC compared to HVAC for offshore wind farms, in Offshore / B. Van Eeckhout // European Transaction Electrical Power. – July 2010. – Vol. 20, iss. 5. – P. 661–671.

Булатов Борис Георгиевич, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы», канд. техн. наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; bulatovbg@susu.ac.ru.

Гольдштейн Михаил Ефимович, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы», канд. техн. наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; goldshteinme@susu.ac.ru.

Корбуков Никита Владимирович, аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; bulatovbg@susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 15 августа 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University
Series “Power Engineering”
2014, vol. 14, no. 4, pp. 31–36**

MODELLING FEATURES OF A VSC–HVDC TRANSMISSION EMBEDDED IN AC SYSTEM

B.G. Bulatov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
bulatovbg@susu.ac.ru,

M.E. Goldstein, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
goldshteinme@susu.ac.ru,

N.V. Korbukov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
bulatovbg@susu.ac.ru

The paper considers specifics of mathematical model of DCTV continuous modes being included into power network calculation program developed in Labview software in the department of power plants, networks and systems. The program has such input parameters as network configuration, power line resistances, load and generation capacities, slack bus voltage and calculation accuracy. The paper presents analysis of network losses depending on DCTV load. Examples of post-fault network conditions were used to show positive features of DCTV in comparison with AC transmission. It is shown that applied DCTV extends the boundaries of network mode optimizations and enhances its safety in fault and post-fault modes.

Special feature inherent to the model of DCTV continuous modes is that voltage vectors in the nodes of rectifier and inverter stations are not rigidly connected, and actual line power is regulated independently. In the model, nodes are connected through power consumption in one node and generation in another node, and it is specific that in continuous mode DC circuit of DCTV is described with the same equations as DCT on phase-control converters. Losses in converter transformers and reactors, and converters are factored as loads in the nodes of corresponding stations.

Vector difference between rectifier station voltage and network voltage determines value and direction total capacity of transmission. The same is true for inverter station as related to its adjoining power system. Power-handling transmission capacity is limited to maximum actual current of converter that is limited to standardized current load of power semiconductor devices.

Developed program is designed for educational purposes, and DCTV model can be integrated into industrial programs for calculation and optimization of power system modes.

Keywords: DC transmission, voltage converter, continuous network modes, Labview.

References

1. Erohin P.M., Neujmin V.G., Aleksandrov A.S., Maksimenko D.M. [Modeling of FACTS Devices in the Problems of Calculation and Optimization of Energy Systems]. *Izvestiya NTTs Edinoy energeticheskoy sistemy* [News STC Unified Energy System], 2012, no. 66, pp. 22–28. (in Russ.)
2. Gerasimov A.S., Efimova E.V., Korobkov A.V. [Simulation of DC link voltage converters on environment STC “EUROSTAG”]. *Izvestiya NII postoyannogo toka* [Proceedings of the Research Institute of the DC], 2010, no. 64, pp. 225–236.
3. Goldstein M.E., Filjaev K.Ju. [Universal Mathematical Model of the System with the Valve Asynchronous Communication]. *Electrical Technology Russia*, 2008, no. 6, pp. 12–18. (in Russ.)
4. Goldstein M.E., Korbukov N.V. [A Mathematical Model of VSC–HVDC Transmission for Steady State Operation]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2012, no. 37, pp. 126–128. (in Russ.)
5. Goldstein M.E., Korbukov N.V. [Allowed Continuous Transmission Mode DC-Based Voltage Converter]. *Elektroenergetika glazami molodezhi: trudy IV mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Electric Power Eyes of Youth, Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference]. Novocherkassk, Russian Federation, 2013, vol. 1, pp. 148–151 (in Russ.)
6. Van Eeckhout B. The Economic Value of VSC HVDC Compared to HVAC for Offshore Wind Farms, in Offshore. *European Transactionson Electrical Power*, July 2010, vol. 20, iss. 5, pp. 661–671.

Received 15 August 2014