

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛИТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

М.Е. Гольдштейн, Н.В. Корбуков

г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет

MATHEMATICAL MODEL OF VSC-HVDC TRANSMISSION FOR STEADY STATE OPERATION

M.E. Goldstein, N.V. Korbukov

Chelyabinsk, South Ural State University

Разработана математическая модель длительных режимов передачи постоянного тока на базе преобразователя напряжения, позволяющая выбрать основное оборудование передачи. Адекватность модели проверена в среде MatlabSimulink для биполярной линии 100 МВт на напряжении 80 кВ.

Ключевые слова: передачи постоянного тока, преобразователь напряжения, ШИМ, математическая модель, MatlabSimulink.

The mathematical model for steady state operation of VSC-HVDC transmission has been developed. This model makes it possible to choose the main transmission equipment. The model adequacy has been proved by MatlabSimulink for bipolar line of 100 MW at voltage of 80 kV.

Keywords: HVDC transmission, VSC, PWM, mathematical model, MatlabSimulink.

Современные передачи постоянного тока (ППТ) все чаще выполняют на базе преобразователей напряжения (ПН). ПН работает во всех четырех квадрантах мощности и позволяет независимо регулировать активную и реактивную мощность и переменное напряжение, может работать на слабую сеть, в пределе на автономную нагрузку [1], а также имеет высокое быстродействие в динамических режимах и при реверсе передачи [2]. Для анализа длительных и аварийных режимов передачи на базе ПН (ППТ-ПН), (см. рисунок)

необходима ее математическая модель, которая бы учитывала реальные взаимосвязи передачи с примыкающими энергосистемами. Использовать модели, созданные для передач постоянного тока с фазовым регулированием, не представляется возможным в силу другого принципа работы преобразователей. Модели, позволяющие проанализировать взаимодействия ПН с энергосистемой [3], не обладают универсальностью, достаточной для рассмотрения ППТ-ПН, связанных с энергосистемами, параметры которых могут меняться с изме-

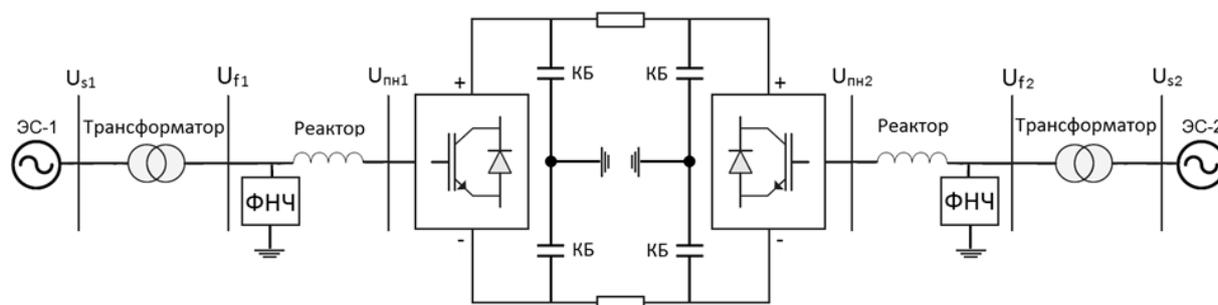


Схема ППТ-ПН

нением состава генерирующих мощностей или нагрузок.

При разработке модели приняты следующие допущения: модель описывает только длительные режимы, специфика работы регуляторов не рассматривается, энергосистемы, трансформаторы и реакторы обладают только индуктивными сопротивлениями, напряжения сети симметричны и представлены только первой гармоникой, выпрямленное напряжение U_d не имеет пульсаций и, наконец, преобразователи работают без потерь.

Сложив индуктивности системы, трансформатора и реактора, получим суммарное сопротивление между шинами системы с напряжением U_s и шинами ПН с напряжением $U_{пн}$:

$$x_{\Sigma} = x_s + x_t + x_r. \quad (1)$$

Межсистемный поток активной мощности:

$$P = \frac{U_s \cdot U_{пн}}{x_{\Sigma}} \cdot \sin \delta. \quad (2)$$

На постоянном токе активную мощность можно найти как:

$$P_d = I_d \cdot U_d. \quad (3)$$

Так как потерями в ПН пренебрегаем, то из выражений (2) и (3) следует:

$$I_d = \frac{U_s \cdot U_{пн}}{x_{\Sigma}} \cdot \sin \delta \cdot \frac{1}{U_d}. \quad (4)$$

Связь постоянного напряжения U_d с переменным для трехуровневого однофазного преобразователя [4]:

$$U_{пн} = \frac{\sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi/3} U_d^2 dt}}{k_m} = \frac{\sqrt{2} U_d}{\sqrt{3} k_m}, \quad (5)$$

где k_m – коэффициент широтно-импульсной модуляции.

Из уравнений (4) и (5) следует

$$I_d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot k_m} \cdot \frac{U_s}{x_{\Sigma}} \cdot \sin \delta. \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) связывают токи и напряжения на сторонах переменного и постоянного тока преобразователей. Таким образом, выражения (1)–(6) описывают нормальные длительные режимы ППТ-ПН при нормируемых коэффициентах модуляции ПН.

Адекватность математической модели в длительных режимах проверена в среде MatlabSimulink для биполярной ППТ мощностью 100 МВт напряжением ± 80 кВ. Параметры первой энергосистемы ЭС-1: 110 кВ, $S_{кз1} = 1000$ МВА,

$x_{с1} = 13,23$ Ом, второй ЭС-2 соответственно: 110 кВ, $S_{кз2} = 500$ МВА, $x_{с2} = 26,46$ Ом. Преобразовательные трансформаторы 110/80 кВ мощностью $S_{мп} = 120$ МВА представлены сопротивлениями $x_t = 16,84$ Ом, сопротивление реакторов $x_r = 9,24$ Ом, сопротивление линии постоянного тока $r_{л} = 1,8$ Ом. Расчет проведем в относительных единицах для базисной мощности $S_б = 100$ МВА и средней ступени напряжения на высокой стороне трансформатора $U_{ср.ст} = 115$ кВ.

Для стороны постоянного тока:

$$\begin{cases} U_d^B - U_d^H = I_d R_{л}, \\ U_d^B I_d = P_d / 2, \end{cases} \quad (7)$$

где U_d^B и U_d^H – напряжения одного полюса.

Приняв $U_d^H = 80$ кВ, $P_d = 100$ МВт, получаем:

$$U_d^B = 81,11 \text{ кВ}. \quad (8)$$

Для выпрямительной подстанции из (1):

$$x_{\Sigma}^* = x_{с1}^* + x_t^* + x_r^* = 0,10 + 0,167 + 0,144 = 0,411 \text{ о.е.} \quad (9)$$

Из выражений (5) и (2) при $k_m = 0,86$ находим соответственно $U_{пн1} = 77,01$ кВ и угол δ :

$$\begin{aligned} \delta &= \arcsin \left(\frac{P^* x_{\Sigma}^*}{U_s^* U_{пн}^*} \right) = \\ &= \arcsin \left(\frac{1 \cdot 0,411}{1 \cdot 77,01 / 80} \right) = 25,28^\circ. \end{aligned} \quad (10)$$

Измеренный по осциллограммам Matlab фазовый сдвиг сетевого напряжения и напряжения ПН совпал с расчетным.

Таким образом, разработанная математическая модель длительных режимов ППТ-ПН адекватна. В дальнейшем при развитии модели предстоит на основе исследований различных длительных и динамических режимов ППТ, в т. ч. асинхронной связи энергосистем расширить функциональные возможности модели как силовой части ППТ, так и ее регуляторов.

Литература

1. Режимы работы передач и вставок постоянного тока, выполненных на основе преобразователей напряжения / М.А. Бульгина, Т.А. Гуцина, Л.А. Коцеев и др. // Электрические станции. – 2004. – № 5. – С. 34–43.
2. Кочкин, В.И. Преобразователь напряжения как управляемый элемент электрических сетей / В.И. Кочкин, М.В. Пешков, Д.В. Романенко // Известия НИИПТ. – 2004. – № 60. – С. 128–146.
3. Гольдштейн, М.Е. Универсальная математическая модель системы с вентильными асин-

Краткие сообщения

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

4. Hingorani, N.G. *Understanding FACTS: con*

cepts and technology of flexible AC transmission systems / N.G. Hingorani, L. Gyugyi. – New York.: IEEE Press, 2000. – 432 p.

Поступила в редакцию 03.10.2012 г.

Гольдштейн Михаил Ефимович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические станции, сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – силовая электроника, системы возбуждения электрических машин, интеллектуальные сети, техника высоких напряжений. Контактный телефон: (351)267-92-46. E-mail: meg@esls.susu.ac.ru

Goldshteyn Mikhail Efimovich – Candidate of Science (Engineering), Professor, Head of the “Electric Power Stations, Networks and Systems” Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: power electronics, excitation systems of electrical machines, smart grids, high-voltage engineering. Contact telephone number: (351)267-92-46. E-mail: meg@esls.susu.ac.ru

Корбуков Никита Владимирович – аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – силовая электроника, гибкие системы передачи переменного тока.

Korbukov Nikita Vladimirovich – Postgraduate student of the “Electric Power Stations, Networks and Systems” department of South Ural State University, Chelyabinsk. The field of scientific interests is power electronics and flexible AC transmission systems.