

УДК 621.316; 621.331.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПО НАПРЯЖЕНИЮ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ

Бадретдинов Т.Н.

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (Ташкент, Узбекистан)

Разработана математическая модель и проведен анализ системы адаптивного управления напряжением и компенсации реактивной мощности тяги переменного тока для минимизации активных потерь. Целью статьи является обоснование выбора алгоритма адаптивного регулирования напряжения и параметров компенсатора реактивной мощности на основе непрерывного измерения показателей работы системы внешнего электроснабжения при моделировании режимов её работы с учетом влияния системы тягового электроснабжения.

Ключевые слова: реактивная мощность, тяговое электроснабжение, регулирование напряжением, потери мощности, компенсация реактивной мощности, тяговая подстанция.

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-02-226-231

Система электроснабжения электрифицированной железной дороги является объектом с изменяющейся структурной и параметрами и, следовательно, должна управляться на основе информации о свойствах объекта управления и внешних воздействий, а также обеспечивать ее приспособляемость к изменяющимся условиям работы. Такие системы в теории автоматического управления называются адаптивными. В них применяется математическая модель, обеспечивающая простой и надежной способ управления сложной системой [1].

Применение оптимизационного решения в режиме реального времени требует использования полной математической модели тягового электроснабжения. Это требует использования вычислительной техники, позволяющей выбирать оптимальный вариант на основе введенной исходной информации, часть которой снимается в режиме реального времени непосредственно с объекта, а также прогноза ситуации на базе использования таких статистических параметров как математическое ожидание, дисперсия, стандартное отклонение, авто- и взаимокорреляционные функции. Показателем качества регулирования в данном случае являются потери активной мощности, которые должны быть минимальными в пределах допустимых пороговых уровнях напряжения.

Одним из направлений достижения надежной и экономичной работы электроподвижного состава и в целом системы электроснабжения является совершенствование существующих способов регулирования напряжения, учитывая изменения параметров

компенсирующей установки, а также применения других устройств повышения качества электроэнергии.

В настоящее время широко распространены ряд способов уменьшения диапазона регулирования длительных изменений напряжения, тогда как на практике чаще всего происходят кратковременные изменения напряжений. Они влияют на его стабильность, от которой зависит скорость движения работы электроподвижного состава и эффективность работы системы тягового электроснабжения.

Наиболее простой и эффективный способ регулирования напряжения в тяговой сети электрических железных дорог - это регулирование напряжения на шинах подстанции и в тяговой сети, а также на посту секционирования при двухсторонней схеме питания [2]. На тяговых подстанциях для регулирования, в основном, используют установку регулирования под нагрузкой трансформатора [3].

Резкие изменения нагрузки плеча тяговой подстанции, в которое включена компенсирующая установка, приводят к уменьшению потери напряжения в системе до неё и, следовательно, к увеличению её мощности, что в свою очередь вызовет дополнительное увеличение напряжения в тяговой сети. Чтобы это напряжение не превышало допустимое, необходимо применять продольно-поперечные компенсаторы с регулируемым параметрами [7].

Целью настоящей статьи является обоснование выбора алгоритма адаптивного регулирования напряжения и параметров компенсатора реактивной мощности на основе

непрерывного измерения показателей работы системы внешнего электроснабжения при моделировании режимов её работы с учетом влияния системы тягового электроснабжения. В частности, предусматривается возможность регулирования напряжения тягового трансформатора под нагрузкой при включенных в тяговую сеть установок продольно-поперечных компенсаторов с учетом продольной и поперечной несимметрии параметров системы внешнего электроснабжения и его реальных параметров, а также нелинейного характера вольт-амперной характеристики электроподвижного состава.

В данной работе в первом приближении будем рассматривать систему внешнего электроснабжения с одной тяговой подстанцией с регулируемым трансформатором, оснащённым установкой регулирования под нагрузкой, и регулируемой установкой поперечной емкостной компенсации (рис. 1).

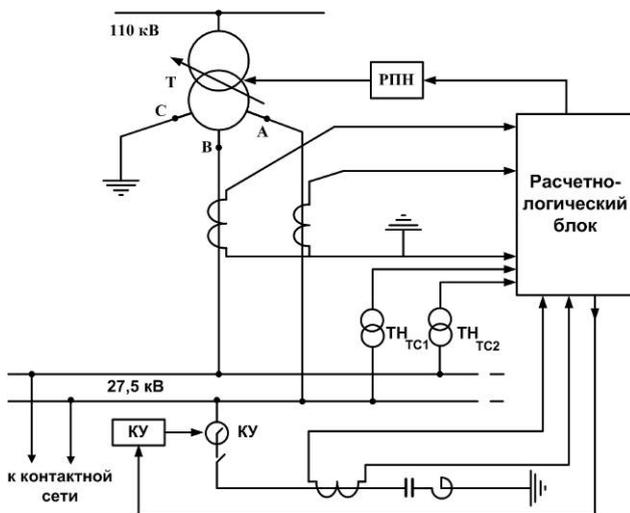


Рис. 1. Формирование математической модели тяговой подстанции (КУ - компенсирующая установка; РПН - установка регулирования под нагрузкой)

Основой расчетно-логического блока является математическая модель регулирования, выбирающая оптимальный режим электроснабжения:

$$\Delta P(\Delta U)_i \leq \Delta P_0 \quad (1)$$

при условии:

$$\begin{aligned} U - U_{k \max} &\leq 0; \\ U - U_{k \min} &\geq 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta P(\Delta U)_i$ – потери мощности при изменении напряжения на ΔU при i -м изменении

режима; ΔP_0 – потери мощности системы в предварительном режиме; $U_{k \max}$, $U_{k \min}$ – допустимые максимальное и минимальное регулируемые напряжения на фидере.

Величина ΔP_0 есть активная составляющая суммарных потерь мощности трехфазных трансформаторов тяговых подстанций $\Delta S_{ТПП}$, потери мощности от уравнильных токов $\Delta S_{ур}$, а также потери мощности в тяговой сети $\Delta S_{ТС}$:

$$\Delta S = \Delta S_{ТПП} + \Delta S_{ур} + \Delta S_{ТС}. \quad (3)$$

Составляющие мощности в выражениях (1) и (3) выразим через напряжение, подаваемое на тяговой трансформатор, учитывая диагональную матрицу его сопротивлений фаз Z_{Δ}^{θ} со схемой соединения «звезда-треугольник»:

$$\Delta \underline{U} = \Delta \underline{Z}_{\Delta} c \underline{I}. \quad (4)$$

где c – матрица связи токов обмотки и токов тяговой сети; \underline{I} – вектор столбец токов тяговой сети и трансформатора, нагруженного тяговой сетью.

Здесь и далее тяговой трансформатор и тяговая сеть выражаются через диагональные матрицы сопротивлений, первой матрицей инцидентности, блочно-диагональной матрицей связи токов трансформаторов и токов нагрузки на основе приведенной эквивалентной схемы замещения тягового электроснабжения, представленного на рис. 2.

Учитывая, что токи I_A, I_B, I_C в тяговой обмотке соединенной в «треугольник», выражаются через токи I_a, I_b, I_c тяговой нагрузки и ДПР в виде

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \frac{1}{3}(2\underline{I}_a - \underline{I}_b - \underline{I}_c); \\ \underline{I}_B &= \frac{1}{3}(-\underline{I}_a + 2\underline{I}_b - \underline{I}_c); \\ \underline{I}_C &= \frac{1}{3}(-\underline{I}_a - \underline{I}_b + 2\underline{I}_c) \end{aligned} \quad (5)$$

и учете уравнильного в тяговой обмотке матрица-столбец токов тягового трансформатора можно записать как

$$\underline{I} = C(\underline{I}_T + M \cdot \underline{I}_V), \quad (6)$$

где \underline{I}_V – матрица-столбец уравнильных токов; C – блочно-диагональная матрица связи токов тягового трансформатора и токов тяго-

Таким образом, последние формулы являются математической моделью с указанными допущениями закона изменения напряжения для расчета потерь системы тягового электроснабжения. При этом потери активной мощности определяются как:

$$\Delta P_C = R_e(\Delta S_C) = (\underline{I}_T^* + M \cdot \underline{I}_V^*)^T R_{OY} \times$$

$$\times (\underline{I}_T + M \cdot \underline{I}_V) + \underline{I}_V^{*T} R_{TC} \underline{I}_V + \Delta S_{TC}. \quad (12)$$

Подставляя выражение (11) в (12), получим полное выражение потерь активной мощности при изменении коэффициента трансформации тягового трансформатора k^δ . Для управления режимом напряжения в регулирующем блоке вычисляется изменение прироста потерь Π путем дифференцирования матричной формулы (12), которую после математических преобразований можно выразить в виде:

$$\Pi = \frac{\partial(\Delta P_C)}{\partial k^\delta} = \frac{\partial(\underline{I}_T^* + M \cdot \underline{I}_V^*)^T}{\partial k^\delta} R_{OY} k^\delta \times$$

$$\times (\underline{I}_T + M \cdot \underline{I}_V) + 2 \frac{\partial(\underline{I}_T^* + M \cdot \underline{I}_V^*)^T}{\partial k^\delta} \times$$

$$\times R_{OY} (\underline{I}_T + M \cdot \underline{I}_V) + \frac{\partial(\underline{I}_V^{*T})}{\partial k^\delta} R_{TC} \underline{I}_V, \quad (13)$$

где $R_{OY} = R_e(Z_{OY})$ – матрица узловых активных сопротивлений системы внешнего электроснабжения; $R_{TC} = R_e(Z_{TC})$ – матрица активных сопротивлений ветвей тяговой сети.

Составляющие сопротивления тяговых трансформаторов определяются соотношениями

$$R_{Tp} = \frac{U_H^Z P_{к.з.}}{S_H^2} \cdot 10^3;$$

$$X_{Tp} = U_K U_H^Z \cdot 10^{-2} / N_T S_H,$$

где $P_{к.з.}$ – потери мощности в опыте короткого замыкания, кВт; S_N – номинальная мощность трансформатора, кВ·А; N_T – число параллельно работающих трансформаторов; U_K – напряжения короткого замыкания, %.

Активное и реактивное сопротивления питающей линии должны приводиться к напряжению тяговой обмотки.

Повышение напряжения вследствие включения компенсирующей установки на тяговой подстанции определяется как

$$\delta U\% = \frac{U_K U}{U_H} \cdot 100\% =$$

$$= \frac{2x_{\Pi}}{x_K - 2x_{\Pi}} \cdot \frac{U}{U_H} \cdot 100\% \approx \frac{1}{x_K / 2x_{\Pi} - 1},$$

где $X_K = U_K / I_K$ – реактивное сопротивление компенсирующей установки; $X_{\Pi} = X_{BH} + X_{TC}$, X_{BH}, X_{TC} – реактивные сопротивления внешнего электроснабжения и тяговой сети соответственно.

С учетом повышения напряжения на шинах подстанции суммарное напряжение в точке включения компенсирующей установки в тяговой сети в матричной форме можно записать:

$$\underline{U}_{TK} = \underline{U}_T + \underline{I}_K C M (x_{\Pi} + L x_{TC}),$$

где \underline{U}_{TK} – напряжение в месте установки L_K до и после включения компенсирующей установки.

Схема работает следующим образом. Расчетно-логический блок, в который заложена математическая модель с учетом выражения (13), на основе поступающей изменённой информации о нагрузке тяговой сети, параметрах компенсирующей установки и автоматического регулирования под напряжением тягового трансформатора рассчитывает токораспределения, напряжения по узлам и потери мощности. Далее происходит анализ выполнения условия (2) и сравниваются по согласно выражению (1) потери мощности. Расчет повторяется с использованием заранее накопленного статического материала для каждого шага изменения k^δ , пока не будет найден вариант регулирования, удовлетворяющий условиям (1) и (2). По результатам анализа расчетно-логический блок дает сигнал на переключение отпайки регулирования под напряжением в сторону уменьшения или увеличения k^δ и соответствующий сигнал на включение и отключение компенсирующей установки.

Вышеуказанная система базируется преимущественно на теоретической концепции, как любая самонастраивающаяся адаптивная система, позволяющая определять чувствительность системы к вариациям и предусмат-

ривает возможность регулирования напряжения тягового трансформатора под нагрузкой и изменения параметров установок продольной и поперечной компенсации для минимизации активных потерь при отклонениях переходного режима внешнего и тягового электроснабжения и задания энергосистемы в допустимых интервалах неопределенности, характеризуемого верхними и нижними границами гарантированных значений.

Список литературы

1. Герман, Л.А. Эффективность регулирования напряжения трансформатора тяговой подстанции переменного тока / Л.А. Герман // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. - № 5. – С. 26-30.
2. Герман, Л.А. Современная схема продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения / Л.А. Герман, В.П. Гончаренко // Вестник РГУПС. – 2013. - №2. – С. 12-17.
3. Почаевец, В.С. Автоматизированные системы управления устройствами электроснабжения железных дорог / В.С. Почаевец. - М: Маршрут, 2016. – 314 с.
4. Герман, Л.А. Автоматическое регулирование напряжения трансформаторов на

тяговых подстанциях переменного тока / Л.А. Герман, Д.А. Куров // Электроника и электрооборудование транспорта. - 2012. - № 1. – С. 19-26.

5. Перетяцько, В.А. Проблемы регулирования напряжения / В.А. Перетяцько. - Чернигов: ОАО ЭК «Черниговоблэнерго», 2011.

6. Черемисин, В.Т. Оценка регулирования напряжения на стороне высшего напряжения тяговых подстанций в аспекте энергетической эффективности / В.Т. Черемисин, В.Л. Незевак, В.В. Эрбес // Транспорт Урала. - 2017. - № 3 (54). – С. 75-81.

7. Laufenbero, M.J. Sensitivity theory in power systems: applications in dynamic security analysis control Applications / M.J. Laufenbero, M.A. Pai // Proceedings of the 1996 IEEE International Conference. - Dearborn, 1996. - P. 738-743.

Сведения об авторе

Бадретдинов Тимур Наильевич – ассистент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта (Узбекистан), tim_bad2107@mail.ru.

OPTIMIZATION OF TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM MODES BY VOLTAGE AND REACTIVE POWER TO REDUCE LOSSES

Badretdinov T.N.

Tashkent institute of railway engineering (Tashkent, Uzbekistan)

The mathematical model is elaborated and analysis of the system is done on the adaptive voltage control and reactive power compensation of AC traction to minimize active losses. Sharp changes in the load shoulder traction substation, which includes a compensating installation, leads to a decrease in the voltage loss in the system to it, and therefore to an increase in its power, which in turn will cause an additional increase in voltage in the traction network. To this voltage does not exceed the permissible, it is necessary to use longitudinal-transverse compensators with adjustable parameters. The purpose of this article is to justify the selection of an algorithm for adaptive voltage regulation and parameters of the reactive power compensator based on continuous measurement of the external power supply system in the simulation of its operation modes, taking into account the influence of the traction power supply system. In particular, it provides for the possibility of regulating the voltage of the traction transformer under load when included in the traction network of longitudinal-transverse compensators installations, taking into account the longitudinal and transverse asymmetry of the power supply system parameters and its real parameters, as well as the non-linear nature of the current-voltage characteristics of the electric rolling stock. In this paper, we will consider in a first approximation a power supply system with a single traction substation with an adjustable transformer equipped with voltage regulation under load, and an adjustable installation of transverse capacitive compensation of compensating installation.

Keywords: reactive power, traction power supply, voltage regulation, power loss, reactive power compensation, traction substation,

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-02-226-231

References

1. German L.A. Effektivnost regulirovaniya napryazheniya transformatora tyagovoy podstantsii peremennogo toka. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2013, No.5, pp. 26-30. (In Russian)

2. German L.A., Goncharenko V.P. Sovremennaya skhema prodolnoy emkostnoy kompensatsii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya. *Vestnik RGUPS*, 2013, No.2, pp. 12-17. (In Russian)

3. Pochaevec V.S. *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya ustroystvami elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog*. Moscow, Mashrut, 2016. 314 p. (In Russian)

4. German L.A., Kurov D.A. Avtomaticheskoe regulirovanie napryazheniya transformatorov na tyagovykh podstantsiyakh peremennogo toka. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2012, No.1, pp. 19-26. (In Russian)

5. Peretyatko V.A. *Problemy regulirovaniya napryazheniya*. Chernigov, OAO EK «Chernigovoblenergo», 2011. (In Russian)

6. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Ehrbes V.V. Otsenka regulirovaniya napryazheniya na storone vysshego napryazheniya tyagovykh podstantsiy v aspekte energeticheskoy effektivnosti. *Transport Urala*, 2017, No.3, pp. 75-81. (In Russian)

7. Laufenbero M.J., Pai M.A. Sensitivity theory in power systems: applications in dynamic security analysis control Applications. *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference*, Dearborn, 1996, pp. 738-743.

Author' information

Timur N. Badretidinov – Assistant of the Department “Power supply of railway transport” at Tashkent institute of railway engineering (Uzbekistan), tim_bad2107@mail.ru.

Дата принятия к публикации
(Date of acceptance for publication)
28.05.2018

Дата публикации
(Date of publication):
25.06.2018

