



УДК 621.314

В. Г. Ягуп, докт. тех. наук
Харьковская национальная академия
городского хозяйства
Е. Я. Ивакина, асп.
Харьковская национальная академия
городского хозяйства

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

Основным звеном тяговой подстанции городского электротранспорта является неуправляемая выпрямительная установка. Возникающая при этом проблема повышения энергетических характеристик тяговой подстанции связана улучшением ее электромагнитной совместимости с питающей сетью и нагрузкой

Большинство известных работ в области исследования электромагнитных и динамических процессов базируются на идеализации выпрямителя как симметричной системы [1, 2, 3]. Такой подход определяет частотные спектры гармонических составляющих на входе и выходе выпрямителя построением его силовой схемы. Результаты работы [4] во многом дополняют пробелы в исследованиях данного вопроса, однако анализ гармонического состава коммутационных искажений ограничен воздействием несимметрии управления тиристорного выпрямителя

Подключение выпрямителя к сети в расчетной схеме осуществляется через приведенное реактивное сопротивление трансформатора X_n , которое совместно с сопротивлением сети X_c определяет относительное результирующее значение напряжения короткого замыкания преобразователя при номинальном токе $I_{dн}$

$$\bar{E}_{кз} = \frac{2I_{dн}(X_c + X_n)}{\sqrt{6} \cdot E_\phi} \quad (1)$$

В случае когда ток нагрузки выпрямителя хорошо сглажен, искажение напряжения питающей сети происходит только на интервалах коммутации.

На этих интервалах наблюдаются частичные короткие замыкания в зависимости от вида соединений обмоток трансформатора линейных или фазных напряжений. Относительное значение реактанса выпрямителя и сети, определяющее величину коммутационного провала, в обоих случаях соединения обмоток равны

$$\frac{X_n}{X_c} = E_{кз} \frac{S_{кз}}{P_{dн}} - 1 \quad (2)$$

где $P_{dн} = U_{dо} \cdot I_{dн} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_\phi \cdot I_{dн}$.

Угловая длительность коммутационного интервала определяется уравнением [5], которое с учётом (1) можно записать в следующем виде

$$\gamma_o = \arccos\left(1 - \bar{E}_{кз} \frac{I_d}{I_{dн}}\right). \quad (4)$$

Площадь коммутационного провала определяется интегралом от индуктивного падения [5] на интервале коммутации. Так, для фазного напряжения, записанная в относительных единицах, эта площадь равна

$$\bar{S}_{кф} = \frac{X_c I_d}{\sqrt{2} \cdot E_{ф}} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{P_{дн}}{S_{кз}} \cdot \frac{I_d}{I_{дн}}. \quad (5)$$

Таким образом, полная информация о коммутационных искажениях напряжения сети выражается через приведенные параметры:

$\frac{P_{дн}}{S_{кз}}$ – отношение номинальной мощности тиристорного преобразователя к полной

мощности короткого замыкания питающей сети;

$\bar{E}_{кз}$ – относительное напряжение короткого замыкания преобразователя;

$\frac{I_d}{I_{дн}}$ – относительная нагрузка преобразователя.

За период напряжения питающей сети в фазном напряжении содержится четыре коммутационных площадки. Мгновенное значение индуктивного падения напряжения на коммутационном интервале изменяется по закону

$$U_{xf} = (X_n + X_c) \frac{dI_d}{d\theta} = U_d - U_{d\gamma} = E_{\phi m} \sin \frac{2\pi}{m} \cdot \sin \theta, \quad (6)$$

где $U_{d\gamma} = E_{\phi m} \cos \frac{2\pi}{m} \cdot \cos \theta$ – выходное напряжение выпрямителя на коммутационном интервале.

В линейном напряжении содержится шесть коммутационных площадок. На четырёх из них индуктивные падения напряжения изменяются согласно (6), а на оставшихся двух описываются выражением

$$U_{xl} = 2\sqrt{3} E_{\phi m} \sin \frac{\pi}{m} \cdot \sin \theta. \quad (7)$$

Несимметрия питающих э.д.с. вызывает модуляцию площадей импульсных падений на интервалах коммутации. Информацией о неканонических гармониках являются приращения площадей коммутационных провалов

$$E_{un}(\theta) = \frac{dS_{к}}{d\gamma_n}. \quad (8)$$

Анализ влияния несимметрии питающих э.д.с. на гармонический состав коммутационных искажений удобно выполнять применением метода симметричных составляющих [6].

На каждом из коммутационных интервалов индуктивные падения определяются суммой векторов прямой и обратной последовательностей. Так, для напряжения фазы

А импульсная последовательность, несущая информацию о гармоническом составе коммутационных искажений, представляется в следующем виде

$$U_{u\phi}(\theta) = E_{1\phi m} \sin \frac{2\pi}{m} \left\{ \sum_{n=1}^4 \sin \left[\theta - \frac{2\pi}{m}(n-1) \right] + \varepsilon \sum_{n=1}^4 \sin \left[\theta + \psi_2 + \frac{4\pi}{m}(n-1) \right] \right\}, \quad (9)$$

где $E_{1\phi m}$ - амплитудное значение прямой последовательности несимметричных э.д.с.;

$$\theta \in \left\{ \left[\frac{2\pi}{m}(n-1) \right]; \left[\gamma_o + \frac{2\pi}{m}(n-1) \right] \right\}.$$

Первое слагаемое приведенного выражения определяет канонические гармоники коммутационных искажений. Разложение в ряд Фурье второго слагаемого (E_{u2}) позволяет получить информацию о неканонических гармониках, генерируемых преобразователем в э.д.с питающей сети

$$U_{\phi v} = \frac{\varepsilon E_{1\phi m}}{\pi} \sin \frac{2\pi}{m} \sum_{n=1}^4 \int_{\frac{2\pi}{m}(n-1)}^{\gamma_o + \frac{2\pi}{m}(n-1)} \sin \left[\theta + \psi_2 + \frac{4\pi}{m}(n-1) \right] e^{-jv\theta} d\theta. \quad (10)$$

Выполнив преобразования, связанные с вычислением интеграла от информационной составляющей E_{u2} , представим выражение для комплексных амплитуд неканонических гармоник в виде двух составляющих

$$\dot{U}_{\phi v1} = \frac{\varepsilon E_{1\phi m}}{2\pi(v-1)} \sin \frac{2\pi}{m} e^{j\psi_2} \left[e^{-j(v-1)\gamma_o} - 1 \right] \sum_{n=1}^4 e^{-j \left[v \frac{2\pi}{m}(n-1) + \frac{2\pi}{m}(n-3) \right]};$$

$$\dot{U}_{\phi v2} = \frac{\varepsilon E_{1\phi m}}{2\pi(v+1)} \sin \frac{2\pi}{m} \cdot e^{j\psi_2} \left[e^{-j(v+1)\gamma_o} - 1 \right] \sum_{n=1}^4 e^{-j \left[v \frac{2\pi}{m}(n-1) - \frac{2\pi}{m}(n-3) \right]};$$

$$\dot{U}_{\phi v} = \dot{U}_{\phi v1} - \dot{U}_{\phi v2}. \quad (11)$$

Выражение (11) позволяет получить выражения для модулей амплитуд неканонических гармоник разных порядков. Так, для мостовой схемы

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\phi v} = \mp \frac{\sqrt{3}\varepsilon E_{1\phi T}}{\pi} e^{j\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)} & \left\{ \frac{1}{v-1} \sin(v-1) \frac{\gamma_o}{2} \cdot e^{j \left[(v-1) \left(\frac{\gamma_o}{2} \right) + \psi_2 \right]} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{v+1} \sin(v+1) \frac{\gamma_o}{2} \cdot e^{-j \left[(v+1) \left(\frac{\gamma_o}{2} \right) + \psi_2 \right]} \right\}. \quad (12) \end{aligned}$$

В данном выражении знак "-" и $\varphi=0$ соответствует неканоническим гармоникам с порядковыми номерами $\nu=3,9,15,\dots$, знак "+" и $\varphi= -\pi/3$ имеют гармоники $\nu=5,11,17,\dots$ $\nu=7,13,19,\dots$.

Достаточно точное приближение при вычислении амплитуд неканонических гармоник даёт замена реального импульса информационной составляющей E_{i2} о воздействии несимметрии питающих э.д.с. равновеликим по площади прямоугольным импульсом

$$S_\varepsilon = \frac{2\varepsilon E_{1\phi m}}{\pi} \sin \frac{2\pi}{m} \cdot \sin \frac{\gamma_o}{2} \cdot \sin \left[\frac{\gamma_o}{2} + \psi_2 - \frac{2\pi}{m}(n-3) \right]. \quad (13)$$

В этом случае выражение для комплексных амплитуд неканонических гармоник приобретает следующий вид из которого легко получить выражения для амплитуд неканонических гармоник, генерируемых преобразователем в питающую сеть при несимметрии питающих э.д.с. и равноинтервальном управлении. Так, амплитуды неканонических гармоник $\nu=3,9,15,\dots$ определяются следующим выражением

$$\dot{U}_{\phi\nu} = \frac{4\varepsilon E_{1\phi m}}{\nu\pi\gamma_o} \sin \frac{2\pi}{m} \cdot \sin \frac{\gamma_o}{2} \cdot e^{-j\nu\frac{\gamma_o}{2}} \cdot \sin \nu \frac{\gamma_o}{2} \cdot [(-1)^\nu - 1] \times \quad (14)$$

$$\times \left[\sin \left(\frac{\gamma_o}{2} + \psi_2 - \frac{\pi}{3} \right) - e^{-j\nu\frac{\pi}{3}} \cdot \sin \left(\frac{\gamma_o}{2} + \psi_2 + \frac{\pi}{3} \right) \right],$$

$$\dot{U}_{\phi\nu} = -\frac{4\sqrt{3}\varepsilon E_{1\phi m}}{\nu\pi\gamma_o} \sin \frac{\gamma_o}{2} \cdot e^{-j\nu\frac{\gamma_o}{2}} \sin \nu \frac{\gamma_o}{2} \cdot \sin \left(\frac{\gamma_o}{2} + \psi_2 \right). \quad (15)$$

Аналогично можно получить выражение для амплитуд неканонических гармоник, содержащихся в линейной э.д.с.. Связь между фазными и линейными э.д.с. в условиях несимметрии определяется системой уравнений

$$\begin{cases} \bar{E}_{AB} = \bar{E}_A - \bar{E}_B = 1 - a^2 + (1-a)\varepsilon \cdot e^{j\psi_2}; \\ \bar{E}_{BC} = \bar{E}_B - \bar{E}_C = a(a-1)(1 - \varepsilon \cdot e^{j\psi_2}); \\ \bar{E}_{CA} = \bar{E}_C - \bar{E}_A = a-1 + (a^2-1) \cdot \varepsilon \cdot e^{j\psi_2}. \end{cases} \quad (16)$$

Информационная составляющая E_{i2} об изменении гармонического состава коммутационных искажений линейной э.д.с. состоит из шести индуктивных падений от обратной последовательности несимметрии.

Независимо от вида рассматриваемого напряжения (фазного или линейного) при несимметрии системы питающих э.д.с. и симметричной системе управления коммутационные искажения содержат гармоники нечётных порядков. При этом, наряду с изменением амплитуд канонических составляющих $\kappa=1,5,7,9,\dots$, частотный спектр коммутационных искажений дополняется гармониками с номерами кратными, трём. Величины их амплитуд зависят таким образом от коэффициента несимметрии и фазы обратной последовательности.

Список литературы

1. Шипило В. П. Влияние тиристорного преобразователя на питающую сеть // ЭП. Электропривод, 1970, вып. 1,- с.5-10.
2. Поссе А. В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока.-Л.: Энергия, 1973,-304 с.
3. Солодухо Я. Ю., Замараев Б. С. Улучшение энергетической эффективности тиристорных электроприводов и электрических сетей.-В кн. Автоматизированный электропривод, М.: Энергия, 1980,-408 с.
4. Щербак Я. В. Влияние тиристорного преобразователя на питающую сеть при несимметрии управления//Технічна електродинаміка. - Спеціальний випуск 2,-Том1,-1998.-с40-45.
5. Каганов И. Л. Электронные и ионные преобразователи.-М-Л.:Госэнергоиздат, 1956,-528 с.
6. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники.-М.: Высшая школа.-1978.-527с.

ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ ПОСТІЙНОГО
СТРУМУ ПРИ НЕСИМЕТРІЇ ЖИВИЛЬНОЇ МЕРЕЖИ

В. Г. Ягуп, К. Я. Івакіна

Розглянуто вплив несиметрії живильної мережі на гармонічний склад вхідної напруги некерованого випрямляча з врахуванням комутаційного інтервалу.

ENERGY FACTORS OF DIRECT-CURRENT TRACTION SUBSTATION
WHEN ASYMMETRIC ELECTRIC-SUPPLY LINE

V. G. Yagup, K. Ya. Ivakina

Affecting of asymmetry of feed-in network is considered harmonic composition of entrance tension of out of control rectifier taking into account an interconnect interval.