Максимальные отклонения угла сдвига фаз между ОС при отклонении частоты от промышленной на ±1 Гц могут достигать значений для реализаций формирователей 1, 2, 3 и 4 соответственно ±0,04°; ±1°; ±0,01° и ±0,3°.

В Ы В О Д Ы

1. Предложенные для микропроцессорных токовых защит линий формирователи ортогональных составляющих входных величин имеют приемлемые частотные и динамические свойства, а также характер переходного процесса.

2. Наиболее оптимальное сочетание частотных, динамических и других свойств обеспечивается в формирователях при $n = 10$; $\Delta t = 0{,}00222$ с; $f_{ср} = 120$ Гц и $n = 12$; $\Delta t = 0{,}00181$ с; $f_{ср} = 125$ Гц.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Р о м а н ю к Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок: учеб. пособие / Ф. А. Романюк. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 133 с.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 11.11.2009

УДК 621.315

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОМПЕНСАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Засл. деятель науки и техн. РБ, докт. техн. наук, проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е.

Белорусский национальный технический университет

Развитие электрических сетей осуществляется не только за счет повышения их номинального напряжения, но также благодаря применению различных средств компенсации параметров линий электропередачи и средств управления ими.

В данной статье ставится цель дать оценку этим средствам и систематизировать различные принципы и способы повышения пропускной способности и управляемости линий электропередачи в электрических сетях энергосистем. Наиболее полно впервые эти принципы представлены в [1], где значительное внимание было уделено видам компенсации параметров ЛЭП.

В значительной мере положения теории компенсации параметров линии передачи электрической энергии разработаны А. А. Вульфом [2].

В качестве основных способов компенсации он указал два – компенсацию к натуральному режиму и компенсацию волновой длины линии.

При заданном напряжении натуральная мощность определяется волновым сопротивлением

$$\begin{aligned}\underline{z}_{\text{в}} &= \sqrt{\frac{r_0 - jx_0}{g_0 - jb_0}} = z_{\text{в}}\varepsilon^{-j\xi} = z_{\text{в}}(\cos\xi - j\sin\xi) = \\ &= \left(\frac{r_0 + j\omega L_0 l}{g_0 + j\omega C_0}\right)\exp\left(j\frac{1}{2}\operatorname{arctg} - \frac{\omega L_0 g_0 - \omega C_0 r_0}{r_0 g_0 + \omega^2 L_0 C_0}\right),\end{aligned} \tag{1}$$

где r_0, g_0, $L_0\,C_0$ – удельные параметры ЛЭП; ω – угловая частота.

Следовательно, при $\underline{U} = U \quad \underline{I} = I\varepsilon^{-j\xi}$.

В любой точке линии отношение комплексов $\underline{U}$, $\underline{I}$ равны волновому сопротивлению

$$\underline{z}_{\text{в}} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = z\angle - \xi.$$

Активная мощность в начале линии на фазу

$$P_{1\text{нат}} = U_{\text{ф}1} I_1 \cos\xi = U_{\text{ф}2} I_2 \varepsilon^{2\beta l}\cos\xi = P_{\text{нат}}\varepsilon^{\beta l},$$

где β – коэффициент затухания амплитуды волны.

КПД линии

$$\eta = \frac{P_{2\text{нат}}}{P_{1\text{нат}}} = \varepsilon^{2\beta l}. \tag{2}$$

Перепад напряжений

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{1}{\varepsilon^{-\beta l}} = \frac{1}{\sqrt{\eta}}. \tag{3}$$

Падение напряжения в натуральном режиме от емкости тока нагрузки в индуктивном сопротивлении линии компенсирует падение напряжения в активном сопротивлении. Это определяет неизменность модуля напряжения вдоль линии, а волновое сопротивление линии – натуральную мощность. Поэтому А. А. Вульф [2] компенсацию к натуральному режиму называет компенсацией волнового сопротивления. Компенсацию к натуральному режиму в свое время рекомендовал профессор Р. Рюденберг [1]. Однако для реальной системы передачи, несущей переменную нагрузку, для работы в натуральном режиме потребовались бы регулируемые компенсирующие устройства. Наряду с этим А. А. Вульф указал ряд недостатков настройки к натуральному режиму [2] и рекомендовал второй способ компенсации – компенсацию волновой длины линии. Однако линия электропередачи при этом рассматривается изолированно от генераторов. Если же рассматривать ее совместно с генератором, то получатся несколько иные результаты. Действительно, из выражения эквивалентного сопротивления системы передачи

$$x_{\text{э}} = x_{\text{г}}\cos\alpha l + z_{\text{в}}\sin\alpha l \tag{4}$$

видно, что при уменьшении волновой длины линии параллельно с уменьшением второго слагаемого будет увеличиваться первое слагаемое. Так, согласно зависимости (рис. 1) передаваемой мощности от дальности в интервале от 1500 до 750 км эквивалентное сопротивление системы передачи увеличивается и только с 750 км начинает уменьшаться. В этом смысле, как впервые отмечено [3] и следует из выражения (4), более эффективной оказывается компенсация волнового сопротивления, которая приводит к более быстрому уменьшению, эквивалентному системе передачи. Поэтому в соответствии с [3] следует указать три основных принципа или способа компенсации параметров линии передачи:

1) компенсация к натуральному режиму;
2) компенсация волновой длины ЛЭП;
3) компенсация волнового сопротивления ЛЭП.

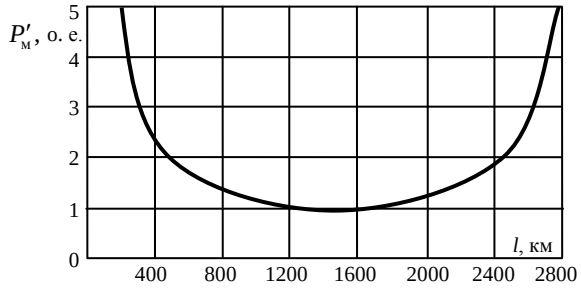

Рис. 1. Зависимость систем предела передаваемой мощности от дальности

С данной А. А. Вульфом [2] оценкой компенсации к натуральному режиму следует согласиться. Компенсация волновой длины, как показывают изложенные выше рассуждения, оказывается менее эффективным принципом уменьшения индуктивного сопротивления, чем дает результат изолированного сопротивления [2] линии электропередачи.

Наиболее эффективным принципом компенсации, повышающим пропускную способность системы передачи, является компенсация волнового сопротивления линии. Поэтому сравнительно простое мероприятие – расщепление фаз, которое уменьшает волновое сопротивление линии, можно считать весьма целесообразным средством повышения пропускной способности систем электропередачи. Этот принцип используется в [4–6 и др.], показывающих широкие возможности для уменьшения волнового сопротивления линии за счет оптимизации конструктивных параметров воздушных линий электропередачи. По существу здесь используется собственная естественная емкость линии как равномерно распределенное компенсирующее устройство.

Двум возможным направлениям (видам компенсации индуктивного сопротивления линии) посредством сосредоточенных устройств и равномерно распределенной емкостной проводимости будут соответствовать свои технико-экономические показатели. Важно каждому выбранному варианту дать экономическую оценку. Система передачи с установкой продольной компенсации (УПК) традиционного типа по капитальным затратам будет уступать воздушной линии повышенной натуральной мощности (ПНМ) с увеличенным числом проводов в фазе при выполнении неравенства [3]

$$\frac{p^2 \sin\lambda}{p_{\text{нат}} \cos^2 \varphi}(1-\nu)a_c \cdot 10^3 > \beta K_1 l, \qquad (5)$$

где p – удельная передаваемая мощность; λ – волновая длина линии передачи; $\nu = \frac{z_{\text{в}}^1}{z_{\text{в}}}$ – отношение волновых сопротивлений линии с увеличенным числом и традиционным числом проводов в фазе; a_c – стоимость 1 кВ·А установки продольной компенсации; β – коэффициент, показывающий во сколько раз 1 км линии ПНМ дороже, чем K_1 – стоимость 1 км традиционной линии; l – длина линии.

Полезно сослаться на пример оценки [3, 7] мероприятий повышения пропускной способности по проекту системы передачи Куйбышев – Москва в ценах того периода – 1965 г.

Самым экономичным из рассматриваемых мероприятий оказалась продольная конденсаторная компенсация. Сравнительно с уменьшением сопротивления генераторов экономически оправданным оказалось уменьшение сопротивления трансформаторов до 11 %. Расщепление проводов обходится дороже, чем продольная компенсация и уменьшение сопротивления трансформаторов, но оно необходимо как мероприятие против коронирования проводов. При этом, как отмечается в [6], в мировой практике в течение 100 лет используются только линии с минимальным числом проводов в фазе по условиям короны и только в прошлом веке появились линии ПНМ с увеличенным числом проводов в фазе. В соответствии с этим (наряду с технологией гибких электропередач FACTS) технология настройки электропередач на передаваемую мощность заслуживает внимания. Проведенная журналом «Электричество» по этим технологиям дискуссия [8] позволила лучше выявить особенности данных технологий. Они не должны противопоставляться. Настройка электропередачи на передаваемую мощность с помощью УШРТ [6] заслуживает внимания и применения в определенных условиях. Технология гибких электропередач развивается, требует внимания и нуждается в дальнейших исследованиях с учетом ранее проведенных разработок в области систем электропередачи и опыта развития и эксплуатации электроэнергетических систем.

Пример [9] сопоставления системы ПНМ с настройкой на передаваемую мощность посредством УШРТ в составе компактной линии, в которой благодаря дополнительному расщеплению фаз повышаются натуральная мощность и пропускная способность с системами передачи, снабженными статическими компенсирующими устройствами FACTS, показал следующее. Наилучшие технико-экономические показатели получились у варианта с УПК, затем – у варианта ПНМ с настройкой на передаваемую мощность. Поэтому рекомендуется при реконструкции обычных ЛЭП для повышения их пропускной способности применять УПК, а при проектировании новых – проводить технико-экономическое сравнение компактной ВЛ с УШР и обычной – с УПК [9]. Этот результат хорошо согласуется с результатом оценки мероприятий повышения пропускной способности электропередачи Куйбышев – Москва [3, 7, 8].

В Ы В О Д Ы

1. Следует назвать два направления компенсации параметров электропередачи: во-первых, с помощью устройств компенсации или настройки и, во-вторых, за счет равномерно распределенной собственной емкостной проводимости линий электропередачи соответственно оптимизации параметров воздушных линий электропередачи; по существу здесь используется собственная естественная емкость линии как равномерно распределенное компенсирующее устройство.

2. Целесообразно различать три основных принципа компенсации параметров линии передачи: а) компенсация к натуральному режиму; б) компенсация волновой длины ЛЭП; в) компенсация волнового сопротивления ЛЭП. Наиболее эффективным принципом компенсации, повышающим пропускную способность системы электропередачи, является компенсация волнового сопротивления линии.

3. Электропередачи, настроенные на передаваемую мощность и работающие в натуральном режиме, заслуживают внимания и практического применения в определенных условиях.

Технология гибких электропередач будет развиваться, требует внимания и нуждается в дальнейших исследованиях с учетом всех ранее проведенных разработок в области систем электропередачи.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Э л е к т р и ч е с к а я передача больших мощностей на далекие расстояния / под ред. Р. Рюденберга. – М.; Л.: Энергоиздат, 1934.

2. В у л ь ф, А. А. Проблема передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния по компенсированным линиям / А. А. Вульф. – М.: Госэнергоиздат, 1941.

3. П о с п е л о в, Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач / Г. Е. Поспелов. – Минск: Вышэйш. шк., 1967.

4. П р о е к т и р о в а н и е линий электропередачи сверхвысокого напряжения / под ред. Г. Н. Александрова. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.

5. П о с п е л о в, Г. Е. Электрические системы и сети. Проектирование / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин. – Минск: Вышэйш. шк., 1988.

6. А л е к с а н д р о в, Г. Н. Об эффективности применения компенсирующих устройств на линиях электропередачи / Г. Н. Александров // Электричество. – 2005. – № 4. – С. 62–67.

7. П о с п е л о в, Е. Г. О целесообразной степени уменьшения индуктивного сопротивления электропередачи / Е. Г. Поспелов, Г. Е. Поспелов // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 2. – С. 20–28.

8. Т е х н о л о г и я гибких линий электропередачи и электропередач, настроенных на передаваемую мощность: дискуссия // Электричество. – 2007. – № 4. – С. 5–76.

9. Д е м е н т ь е в, Ю. А. Применение управляемых статических компенсирующих устройств в электрических сетях / Ю. А. Дементьев, В. Л. Кочкин, А. Г. Мельников // Электричество. – 2003. – № 9.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 14.04.2009