

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

УДК 621.365

И.В. Жежеленко, д-р. техн. наук

(Украина, г. Мариуполь, Государственное высшее учебное заведение «Приазовский технический университет»)

Ю.А. Папаика, А.Г. Лысенко, канд. техн. наук

(Украина, г. Днепро, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»)

ОЦЕНОЧНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭКВИВАЛЕНТА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Анотація. У запропонованій роботі обґрунтовано застосування методу відносних приростів для аналізу і використання на практиці відомого параметра «економічний еквівалент реактивної потужності»; представлений як приріст втрат активної потужності в усій мережі при збільшенні реактивної потужності у вузлі мережі (т. е. ЦП, ГПП, РП і ін.).

Отримано придатні для практичних цілей розрахункові вирази економічного еквівалента реактивної потужності з використанням частинних похідних активної і реактивної потужності, а також напруги мережі. Аналіз цих виразів дозволяє скористатися запропонованими в статті оціночними значеннями параметрів і підтвердити коректність такого підходу, зокрема, для оцінки значення ЕЕРМ з урахуванням генерування реактивної потужності повітряної лінії.

Виконаний аналіз використання ЕЕРМ для оптимізації складу обладнання трансформаторних підстанцій, а також регулювання напруги підтвердив коректність відповідних підходів.

Ключові слова: реактивна потужність, напруга мережі, повітряна лінія

Аннотация. В предлагаемой работе обосновано применение метода относительных приростов для анализа и использования на практике известного параметра «экономический эквивалент реактивной мощности»; представленный как приращение потерь активной мощности во всей сети при увеличении реактивной мощности в узле сети (т. е. ЦП, ГПП, РП и др.).

Получены пригодные для практических целей расчетные выражения экономического эквивалента реактивной мощности с использованием частных производных активной и реактивной мощности, а также напряжения сети. Анализ этих выражений позволяет воспользоваться предложенными в статье оценочными значениями параметров и подтвердить корректность такого подхода, в частности, для оценки значения ЭЕРМ с учетом генерирования реактивной мощности воздушной линии.

Выполненный анализ использования ЭЕРМ для оптимизации состава оборудования трансформаторных подстанций, а также регулирования напряжения подтвердил корректность соответствующих подходов.

Ключевые слова: реактивная мощность, напряжение сети, воздушная линия

Abstract. In the proposed work, the application of the method of relative increments for the analysis and use in practice of the known parameter "economic equivalent of reactive power" is justified; Presented as increment of active power losses in the whole network with increasing reactive power in the network node (i.e., CPU, GPS, DS, etc.).

The calculated expressions of the economic equivalent of reactive power using partial derivatives of active and reactive power as well as network voltages are obtained for practical purposes. The analysis of these expressions allows using the estimated values of the parameters proposed in the article and confirming the correctness of this approach, in particular, for estimating the EERP value taking into account the generation of reactive power of an overhead line.

The performed analysis of the use of EERP to optimize the composition of equipment of transformer substations, as well as voltage regulation, confirmed the correctness of the corresponding approaches.

Keywords: reactive power, mains voltage, overhead line.

Постановка проблемы и ее связь с прикладными задачами

Применение метода относительных (или удельных) приростов мощностей (потерь, расходных материалов, температур нагрева, других параметров и характеристик физических процессов) в зависимости от малого (или единичного значения другого, влияющего и функционально связанного с ним параметра)

внедрен в практику расчета СЭС в 20 – 30-е годы минувшего века. Обозначая значение исследуемого (изучаемого) параметра через K_d и представляя исследуемые параметры в виде изменений, например, потребляемой мощности W в зависимости от расхода энергии электростанций, с помощью частных производных запишем

$$K_d = \frac{d(\Delta W)}{dE_{st}} \quad (1)$$

В частности, значение дополнительных потерь активной мощности ΔP_Q при изменении реактивной мощности узла сети ΔQ по приведенной выше формуле определяет экономический эквивалент реактивной мощности, обозначаемый K_E .

$$K_E = \frac{d(\Delta P)}{dQ}. \quad (2)$$

Потери активной мощности ΔP , как известно, выражаются формулой

$$\Delta P = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta P_R + \Delta P_Q, \quad (3)$$

где ΔP_R – потери активной мощности, обусловленные протеканием активной мощности; ΔP_Q – потери активной мощности, вызванные протеканием реактивной мощности.

Мера потерь, связанных с протеканием реактивной мощности, согласно (1) и (3), определяет K_E по выражению

$$K_E = \frac{2QR}{U^2}, \quad (4)$$

где Q – значение перетока реактивной мощности; R – активное сопротивление сети.

Значение K_E для узлов систем электроснабжения, как правило, находятся в пределах 0,01 – 0,15 [4].

Физический смысл понятия экономический эквивалент реактивной мощности (ЭЭРМ) – это приращение потерь активной мощности во всей сети при увеличении реактивной мощности в узле сети (например, на шинах ЦП, РП, подстанциях, электростанциях и т. п.).

Получить точное выражение удельных приростов потерь вряд ли возможно в силу многофакторных значений параметров и режимов электрических сетей, а также их изменений во времени. Поэтому пользуются приближенными выражениями с учетом положения, отмеченного В.А. Вениковым, что даже при значительных отклонениях активной и реактивной мощности соответствующие параметры в узлах сети остаются неизменными. Изменения реактивной мощности в узле происходят аналогично изменениям, происходящим в других узлах сети [2].

Результаты исследований

Для получения расчетных выражений для K_E , приемлемых для практических целей, важно оценить значение K_E с учетом уровня напряжения в сети, т. е. найти функцию

$$K_E = \frac{2QR}{U^2} + \Delta K_E(U), \quad (5)$$

где $\Delta K_E(U)$ – составляющая K_E , зависящая от напряжения сети, определяется частными производными

$$\Delta K_E(U) = \frac{\partial P}{\partial U} \cdot \frac{\partial U}{\partial Q}. \quad (6)$$

Приведенное выражение является приближенным, ибо при строгом подходе следовало бы отразить взаимные зависимости всех переменных, входящих в выражение (6).

Ниже представлено решение, согласно которому получается выражение для ΔK_E . Порядок выполнения преобразований:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R; \quad \frac{\partial \Delta P}{\partial U} = -2 \frac{P^2 + Q^2}{U^3} R.$$

Здесь ΔP – потери активной мощности; R – активное сопротивление сети.

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U^2}; \quad \frac{\partial \Delta U}{\partial Q} = \frac{X}{U},$$

где ΔU – потеря напряжения; X – реактивное сопротивление сети.

$$\Delta K_E = -2 \frac{P^2 + Q^2}{U^3} R \cdot \frac{X}{U} = 2 \frac{P^2 + Q^2}{U^4} RX = \frac{2\Delta P}{U^2} X = \frac{2\Delta P}{P \operatorname{tg} \varphi} = \frac{2\Delta P_*}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad (7)$$

В сумме согласно выражениям (4) и (5) получается

$$\Delta K_E = 2 \frac{QR}{U^2} + 2 \frac{P^2 + Q^2}{U^4} RX = 2K_Q + \frac{2\Delta P_*}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (8)$$

где $K_Q = \frac{R}{X}$ – добротность сети.

В качестве примера найдем значение K_E согласно уравнению (8) для сети 110 кВ при $Q = 20$ МВар, $P = 50$ МВт, $R = 12,45$ Ом, $X = 20$ Ом.

$$D = \frac{2 \cdot 20}{110^2} + \frac{2(50^2 + 20^2)}{110^4} \cdot 12,45 \cdot 20 \approx 0,05.$$

В приведенном расчете не учтена генерация реактивной мощности Q_c , обусловленная ВЛ 110 кВ. Учтем величину Q_c , воспользовавшись П-образной схемой замещения ВЛ:

По справочнику [4] для линии 110 кВ длиной 50 км находим $Y = 134,5 \cdot 10^{-6}$ Сим.

Значение $Q_c = U^2 Y = 110^2 \cdot 134,5 \cdot 10^{-6} = 1,62$ МВар.

Коэффициент D_c , учитывающий емкостную генерацию ВЛ 110 кВ:

$$D_c = -2Q_c RX / UY = \frac{2 \cdot 1,62 \cdot 12,45 \cdot 12,15}{110^2} \approx 34 \cdot 10^{-5}.$$

Очевидно, что значение емкостной генерации невелико, поэтому составляющую D_c в дальнейшем учитывать не нужно [1].

Оценочные методы определения экономического эквивалента

Оценочное значение ΔK_E может быть легко найдено, если воспользоваться типичными статистическими характеристиками потребителей, согласно которым повышение напряжения на 1 % приводит к возрастанию активной нагрузки потребителей на 1 %, реактивной – на 2 %:

$$\frac{\partial P}{\partial U} = \frac{P}{U} \left(\text{или} \frac{\Delta P}{U} \right); \quad \frac{\partial Q}{\partial U} = 2 \frac{Q}{U};$$

при этом в относительных единицах $U = 1$.

Найдем значение $\Delta K_E(U)$:

$$\Delta K_E(U) = \frac{\Delta P}{U} \cdot \frac{U}{Q} = \frac{\Delta P}{P \operatorname{tg} \varphi} = 2 \frac{\Delta P_s}{\operatorname{tg} \varphi},$$

т. е. значение ΔK_E то же, что и согласно выражению (8).

Оценочное значение K_E получается при учете известного факта о преобладании сопротивления трансформаторов в значении (величине) общего сопротивления СЭС. С учетом этого значения ΣP сети и $\Sigma Q_{\text{ст}}$ пропорциональны и, соответственно $K_E = K_{\text{add}} \operatorname{tg} \varphi$. Здесь K_{add} – прирост потерь активной мощности при изменении активной нагрузки,

Из выражения (4) можно установить, что значение

$$K_E = 0.$$

имеет место не при нулевом значении реактивной мощности ($Q_0 \neq 0$). Для оценки значения Q_0 следует решить уравнение (8); для упрощения преобразовываем оба члена уравнения (8) сократив на $\frac{2R}{U^2}$ и найдем корни полученного квадратного уравнения

$$Q_0 + \frac{P^2 + Q_0^2}{U^2} X = 0 \text{ или}$$

$$Q_0^2 X + Q_0 U^2 + P^2 X = 0.$$

Решение этого уравнения

$$Q_0 = \frac{-U^2 \pm \sqrt{U^4 - 4P^2 X^2}}{2X}. \quad (9)$$

Очевидно, справедлив знак «плюс» перед корнем.

Пример: передается мощность $P = 30$ МВт по линии 110 кВ длиной 50 км ($X = 0,4 \cdot 50 = 20$ Ом). Искомое значение

$$Q_0 = \frac{-110^2 + \sqrt{110^4 - 4 \cdot 30^2 \cdot 20^2}}{2 \cdot 20} \approx -1,5 \text{ Мвар}.$$

Интерпретация этого факта (т. е. $Q_0 < 1$) приведена в [1], согласно этому источнику, значение $Q_0 < 0$ свидетельствует об избытке реактивной мощности, поступающей от источника.

Экономический эквивалент реактивной мощности в оптимизационных расчетах

Целью расчетов является выбор числа и мощности работающих трансформаторов на подстанции. Как известно, потери мощности в трансформаторах разделяются на постоянные ΔP_C , не зависящие от нагрузки, и переменные ΔP_U , зависящие от квадрата нагрузки:

$$\Delta P_C = \frac{\Delta P_0}{S_T} 100 + I_0 K_E, \quad (10)$$

$$\Delta P_U = \frac{\Delta P_k}{S_T} 100 + U_k K_E \quad (11)$$

где U_k и I_0 – напряжение короткого замыкания и ток холостого хода; ΔP_0 и ΔP_k – потери активной мощности холостого хода и короткого замыкания.

Для трансформаторов 100 – 1200 кВ·А, применяемых на подстанциях промпредприятий, могут использоваться усредненные значения параметров, указанных выше (погрешность не более $\pm 10\%$).

В относительных единицах

$$U_k = 5\% ; I_0 = 2\% ; \Delta P_0 = 0,3\% ; \Delta P_s = 1,5\% [3, 5].$$

Примем $K_E = 0,15$.

В нашем примере $\Delta P_C = 0,3 + 2 \cdot 0,15 = 0,6\%$; $\Delta P_U = 1,5 + 5 \cdot 0,15 = 2,25\%$.

Расчеты с использованием паспортных (каталожных) данных показали результаты $\Delta P_C = 0,63\%$; $\Delta P_U = 2,34\%$. Погрешность не превышает 4%.

Отметим корректность оценочных расчетов с использованием K_E для решения режимных вопросов на трансформаторных подстанциях.

Согласно методическим документам, принятым в странах ЕС, энергосистема задает потребителям целесообразные значения реактивной мощности, потребляемой из энергосистемы во время максимальной Q_{max} и минимальной Q_{min} нагрузок. Для задания соответствующих значений Q_{max} (Q_{min}) используется способ сопоставления значений коэффициентов K_E и $K_{P,Q}$; значение коэффициента $K_{P,Q}$ характеризует изменение активной нагрузки в узле сети (например, в ЦП и т. п.) при единичном изменении реактивной мощности, т. е. $K_{P,Q} = \frac{\partial P}{\partial Q}$ или, оценочное значение

$$K_{P,Q} = \frac{P}{Q} = \frac{\Delta P_*}{\text{tg } \varphi}. \quad (12)$$

Так, при $K_E > K_{P,Q}$ рекомендуется компенсация реактивной мощности в максимальной мере с учетом допустимого уровня напряжения, при $K_E < K_{P,Q}$ рекомендуется отключение источника реактивной мощности с учетом допустимого минимального значения напряжения.

Обычно значения K_E и $K_{P,Q}$ отличаются не более, чем на порядок.

Значение ЭЭРМ используется при использовании «Методики вычисления платы за перетекание реактивной электроэнергии», утвержденной 17.01.02.

Выводы

1. Физический смысл понятия «Реактивная мощность» позволяет использовать его на практике на основе теории синусоидального переменного тока.
2. Выражения, полученные в статье, позволяют определить расчетные параметры как теоретически строго, так и на основе оценочных методов, представленных в статье.
3. Представленные в статье примеры использования экономического эквивалента реактивной мощности для целей электротехнической практики, выполненные с использованием оценочных значений, входящих в соответствующие выражения параметров, подтверждают корректность выбранных оценочных значений.

Список использованных источников

1. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
2. Синьков В.М. Оптимизация режимов энергетических систем / В.М. Синьков, А.В. Богословский, Я.А. Калиновский [и др.]; Под ред. проф. В.М. Синькова. – Киев: Вища школа, 1973. – 278 с.
3. Банін Д.Б. Економічні еквіваленти реактивної потужності. Математичний та чисельний аналіз / Д.Б. Банін, О.С. Яндульський, М.Д. Банін, А.М. Боднар, А.В. Гнатівський // Промелектро. – 2004. – № 1. – С. 22–33.
4. Маркушевич Н.С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии / Н.С. Маркушевич. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 104 с.
5. Pivnyak G.G. Transients in Electric Power Supply Systems: textbook for students of higher educational institutions / G.G. Pivnyak, I.V. Zhezhelienko, Y.A. Papaika; under the editorship of Academician of National Academy of Sciences of Ukraine Professor G.G. Pivnyak. – Switzerland: TTP. – 2016 – 382 p.p.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.