МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МАГНИТОГОРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГОРНО-
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ ИМ. Г.И.НОСОВА

ЮЖНО-УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ
АКАДЕМИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Межвузовский сборник научных трудов

Выпуск 2

Под редакцией доктора техн. наук,
профессора СЕЛИВАНОВА И.А.
и канд. техн. наук, доцента
КАРАНДАЕВА А.С.

Издание МГМА Магнитогорск 1996

УДК 621.31+621.771+669.01

Электротехнические системы и комплексы: Межвузовски сборник научных трудов/ Под ред. И.А. Селиванова и А.С. Карандаева. Магнитогорск: МГМА, 1996. Вып. 2. 140 с.

ISBN 5-230-1016-2

ЭНЕРГЕТИКА. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 62-83:621.316

С.П. Лохов
(Челябинский государственный
технический университет)

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ БАЛАНСИРУЕМЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ

При оптимизационном подходе полная мощность однофазной сети S_S определяется через действующее значение напряжения U_S и тока I_S сети, которые часто представляются взаимно ортогональными составляющими:

$$S_S^2 = U_S^2 I_S^2 = (u_S,u_S)\cdot(i_S,i_S) = (U_{S1}^2+U_{S2}^2+\ldots)\cdot(I_{S1}^2+I_{S2}^2+\ldots) = P_S^2+? \qquad (1)$$

$$P_S = (u_S,i_S) = \frac{1}{T}\int_T u_S\cdot i_S dt = U_{S1}\cdot I_{S1} + U_{S2}\cdot I_{S2} + U_{S3}\cdot I_{S3} + \ldots \qquad (2)$$

В формуле (2) дано интегральное определение скалярного произведения двух периодических функций с записью в виде (x,y). Сама мощность разлагается на ортогональные составляющие, среди которых общепринята активная мощность P_S, а невязка обозначается как одна реактивная мощность Q_S или как сумма нескольких составляющих (реактивной и искажений, например, как писал автор данной статьи в молодости). В 1932 г. С. Фризе предложил использовать не бесконечные ряды гармоник, а всего две ортогональные составляющие: повторяющую напряжение сети (активная) и невязку с формой тока (пассивная или другие термины) [1]. В настоящее время научная общественность принимает формулу (1), но чаще подставляет в нее бесконечный гармонический ряд, получая в итоге преобразование Гильберта. Подход Фризе соответствует процедуре Грамма-Шмидта выделения из тока сети орта с формой напряжения сети и получения ортогонального остатка только для сети (процедура U_S, I_S). Она реализуема [2].

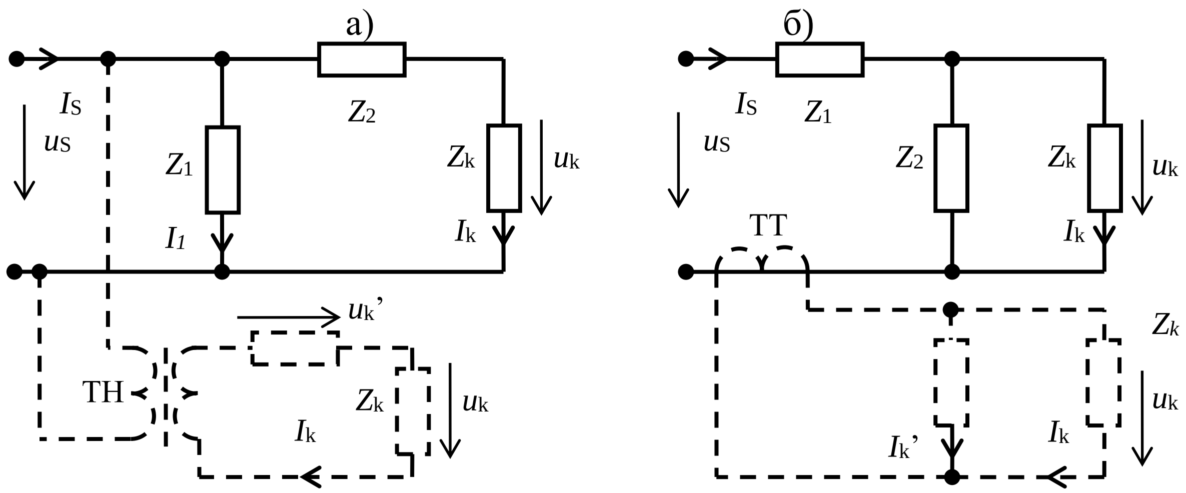
В работе [3] особо отмечено, что «реактивная мощность – величина, для которой справедливо условие баланса по всей цепи переменного тока в целом». Концепция Фризе не давала даже идей, как произвести такой баланс. Важный, но робкий шаг в нужном направлении был сделан Б.С. Замараевым [4]. Эта статья не была замечена научной общественностью, она достаточно сложна для восприятия, а суть ее сводится к тому (не ищите такого объяснения в самой статье, ниже – переложение С.П.Лохова), что ортогонализации Грамма-Шмидта производится дальше с выделением из токов электроприемников (т.е. элементов цепи, подключенных к напряжению сети) ортогональных составляющих с формой тока сети. Кратко эту процедуру можно описать U_S, I_S, $I_k(U_S)$. Доказывается, что полученная таким образом составляющая балансируется в токе сети, а остаток – нет. Аппаратная реализация [5] предложения аналогична предыдущей [2]. Ниже последовательно излагается более простой и общий подход.

В схеме (см. рисунок, а) (только сплошные линии) показана цепь с двумя электроприемниками Z_1 и $Z_2 + Z_k$, которые подключены к напряжению сети. Параллельно включенных электроприемников может быть k. Ток сети равен сумме токов электроприемников, тогда полная мощность сети в интегральной балансируемой форме

$$S_S^2 = U_S^2(i_S,i_1+i_2+\ldots+i_k) = U_S^2(i_S,i_k)+U_S^2(u_S,i_2)+\ldots+U_S^2(i_S,i_k). \qquad (3)$$

Балансируемыми оказались члены с размерностью В·А в квадрате, а не как обычно пытались найти члены с размерностью В·А. Балансируемая мощность отдельного электроприемника оказалась относительной, т.е. ее значение зависит от режима электропотребления всей цепью. В работе [4] нет интегральной формулы (3), но такие же значения относительных мощностей могут быть получены через ортогональные составляющие, если еще найти смелость и перейти к новой размерности. Аналогично для сети последовательно включенных элементов (Z_1, см. рисунок, б) интегральная формула

$$S_S^2 = (u_S,u_1+u_2+\ldots+u_k)I_S^2 = (u_S,u_1)I_S^2+(u_S,u_2)I_S^2+\ldots+(u_S.u_k)I_S^2. \qquad (4)$$



Обобщенная однофазная сеть с двумя электроприемниками [Z_1 и (Z_2+Z_k)]:
а – с параллельным соединением;
б – с последовательным соединением электроприемников

Формулы (3), (4) позволяют рассчитать относительную мощность элемента Z_1 в схемах (см. рисунок), но не позволяют – Z_k.

Второй шаг предполагает применение ортогональных преобразований Грамма-Шмидта формально для всех элементов, участвующих в энергетическом балансе, U_S, I_S, U_k, I_k и применение к полученным ортам аппарата комплексных чисел. При этом порядок процедуры, например I_S, U_S, I_k, U_k, не должен влиять на результат. Предполагается, что формулы (3), (4) дают правильные, но частные решения при совпадении форм напряжений сети и элемента. При обеих процедурах напряжения и токи сети разлагаются по двум ортам. Примем пока во внимание эти два орта и в сигналах элемента. Если ориентироваться на формулу (3), то всю оставшуюся ветвь по отношению к k-му элементу можно представить комплексным трансформатором (оппоненты!) напряжения тоже с двумя коэффициентами

$$(U_1+U_2\cdot j) = \dot{U}_k = \dot{U}_S\cdot\dot{K}_u = (U_{S1}+U_{S2}\cdot j)\cdot(K_{u1}-K_{u2}\cdot j). \qquad (5)$$

Здесь и в дальнейшем сочетания комплексов и сопряженных комплексов подобраны опытным путем.

$$\begin{aligned} K_{u1} &= (U_{S1}\cdot U_1 + U_{S2}\cdot U_2)/U_S^2 = (u_S,u_k)/U_S^2 \qquad (\text{а}) \\ K_{u2} &= (U_{S1}\cdot U_2 - U_{S2}\cdot U_1)/U_S^2 = [u_S,uk]/U_S^2 \qquad (\text{б}) \end{aligned} \qquad (6)$$

$[x,y]$ – стандартное обозначение векторного произведения, для которого

$$[x,y] = -[y,x]; \qquad\qquad [x,x] = 0. \qquad (7)$$

Теперь появляется возможность энергетически эквивалентно подключить элемент Z_k на место элемента Z_1 с эквивалентным комплексным током

$$\dot{I}_{SK} = \dot{I}_K\cdot\dot{K}_u = (K_{u1}\cdot I_1 - K_{u2}\cdot I_2) + (K_{u1}\cdot I_2 + K_{u2}\cdot I_1)\cdot j \qquad (8)$$

и определить относительную мощность по формуле (3)

$$\begin{aligned} S_{Sk}^2 = U_S^2\cdot\mathrm{Re}\{\overset{*}{I}_S\cdot\dot{I}_{SK}\} &= (u_S,u_k)\cdot(i_S,i_k) + [u_S,u_k]\cdot[i_S,i_k] = \qquad (\text{а}) \\ &= (u_S,i_S)\cdot(u_k,i_k) + [u_S,i_S]\cdot[u_k,i_k] = P_S\cdot P_k + Q_S\cdot Q_k = \qquad (\text{б}) \\ &= (u_S,i_S)\cdot(i_S,i_k) - (u_S,i_k)\cdot(u_k,i_S) + (u_S,i_S)\cdot(u_k,i_k) = 1 - 2 + 3 = \qquad (\text{в}) \\ &= 1 + \{-2 + 3\} = (\text{а}) \qquad = \{1 - 2\} + 3 = (\text{б}) \qquad (\text{г}) \end{aligned} \qquad (9)$$

Цифра 2 над мощностью k-го элемента относительно сети S_{Sk} является верхним индексом, указывающим на размерность этой величины, но не квадратом.

Теперь, когда формула окончательного выражения (9) известна, можно получить ее вторым способом, без комплексных трансформаторов через комплексы полных мощностей сети и элемента:

$$\dot{S}_S = \dot{U}_S\cdot\dot{I}_S; \qquad \dot{S}_k = \dot{U}_k\cdot\dot{I}_k; \qquad S_{Sk}^2 = \mathrm{Re}\{\dot{S}_S\cdot\dot{S}_k\}. \qquad (10)$$

Пусть при ортогонализации Грамма-Шмидта в сигналах элемента появятся два орта. Тогда систему комплексных чисел для элемента надо расширить, например, до кватернионов, но никаких новых взаимодействий, кроме активной мощности (U_k,I_k), они не дают, так как им нет адекватных мнимых членов в комплексе мощности сети в последней формуле (10). Поэтому формула (9)

Имеет общий характер. Последним простым способом главная формула (9в) была получена автором давно [6], но тогда не удалось решить проблемы с переходом к трехфазному варианту.

Такой переход становится возможным при третьем способе доказательства. Надо ввести обычные идеальные трансформаторы напряжения с коэффициентом K_u или тока K_i, которые на рисунке показаны штриховыми линиями, и выделить из сигналов элемента соответствующие формы (прямо по Грамму-Шмидту):

$$u_k = K_u \cdot u_S + u'_k \qquad i_k = K_i \cdot i_S + i'_k \qquad \text{(а)}$$

$$K_u = (u_S, u_k)/U_S^2 \qquad K_i = (i_S, i_k)/I_S^2 \qquad \text{(б)} \qquad (11)$$

Первый член в представлении (11а) сразу дает первый член в формуле (9а,в). Второй член в (11а) дает второй член в (9в). Это легко доказывается после простой проверки выражений:

$$(u_S, u'_k) = 0, \qquad [u_S, u'_k] = [u_S, u_k]; \qquad (12)$$

$$S_{Sk}^2 = (u_S, u_k)\cdot(i_S, i_k) + [u_S, u'_k]\cdot[i_S, i_k]. \qquad (13)$$

Полезность единственного штриха в формуле (13) будет в следующей статье для трехфазной сети. Здесь же полезен анализ формул (9). Главная формула (9в) отвечает сформулированным в [6] требованиям ответственности (за загрузку сети тепловыми токами), справедливости (при общем балансе можно несправедливо поделить его), реализуемости (все скалярные произведения типа (2) реализуемы, например, индукционными счетчиками). Остальные формулы имеют больше методологическое значение. Формулы (9а,б) являются вариантами различных группировок фигурными скобками членов 1, 2, 3 в формуле (9в).

Формула (9а) наиболее физична: элемент участвует в общем энергобалансе своим напряжением и током, что проверяется скалярными и векторными произведениями последних, при совпадении любой из форм $u_k = u_S$ или $i_k = i_S$ одно из векторных произведений обнуляется (7) и сразу получаются частные случаи (3), (4). Только такой подход позволил выйти на трехфазный вариант.

Формула (9б) наиболее привычна. Даже создается впечатление, что автор предложил очередное определение реактивной мощности. Удивительно, что

наоборот: формула ставит крест на всех определениях, включая международную договоренность о знаке реактивной мощности. Определить и измерить реактивную мощность цепи невозможно! Но можно определить величину взаимодействия этих мощностей. В формулах (5) взаимодействие заложено неявно в процедуре Грамма-Шмидта при нахождении $U_{S1}\dots U_{S2}$. Двойное векторное произведение представляется скалярными взаимодействиями:

$$[x,y]\cdot[v,w] = [v,w]\cdot[x,y] = (x,v)\cdot(y,w) - (x,w)\cdot(y,v). \qquad (14)$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fryze S. Wirk-, Blind-und Scheinleistung in elektrischen Stromkzeisen mit nichtsinusformigen Uerlauf von Strom und Spannung// Elektrotechnische Zeitschrift. 1932. H25, 26, 29. S. 596-599: 625-627: 700-702.

2. А.с. 705354 СССР, МКИ G 01R 19/06. Способ измерения пассивной составляющей тока.

3. Мельников Н.А. Реактивная мощность в электрических системах. М.: Энергия, 1975. 128 с.

4. Замараев Б.С., Солодуха Я.Ю. Обобщенные энергетические показатели систем с вентильными преобразовательными устройствами// Современные задачи преобразовательной техники. Ч. 4. Киев: Изд-во АН УССР, 1975. С.21-26.

5. А.с. 1335886 СССР, МКИ G 01R 19/06. Способ измерения пассивной составляющее тока и его составляющих.

6. Лохов С.П. Энергетические составляющие в сетях с вентильными преобразователями// Силовая полупроводниковая техника и ее применение в народном хозяйстве: Тез. докл. Миасс; Челябинск, 1989. С. 155-156.

УДК 62-83:621.316

С.П.Лохов

(Челябинский государственный

технический университет)

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ БАЛАНСИРУЕМЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ

Данная работа использует все наработки, литературу и обозначения спаренной статьи в этом сборнике [1]. С.Фризе исследовал однофазную сеть, но конце своей работы отметил, что ясно, как перенести все это на трехфазную сеть. Даже осталось неясным, как он определял полную мощность. Сейчас наиболее принятой (и автором статьи) считается формула

$$S_S^2 = U_S^2 \cdot I_S^2 = (U_a^2 + U_b^2 + U_c^2) \cdot (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) = P_S^2 + ? \qquad (1)$$

Известны другие определения полной мощности, но автору неизвестны попытки осуществления баланса мощностей в трехфазной сети. Если строго следовать к о н ц е п ц и и Фризе и оптимизационному подходу, результатом которого явилась формула (1), то из сигналов сети должны выделяться трехфазные ортогональные составляющие (не предусмотренная Грамом-Шмидтом процедура). Однофазная и трехфазная реализации были предложены автором (10.03.1972) одновременно [1], но эксперты заявили, что формула изобретения защищает оба варианта и привели в описании только однофазный. Трехфазный опубликован в работе [2]. Он решает все вопросы баланса полной мощности (1) для трехфазных электроприемников (слишком смелое заявление: во-первых, в сети, а не в цепи, во-вторых, для одиночного электроприемника, для которого нет понятия баланса) и пригоден для экономических расчетов за любое трехфазное подключение. Не было ясности, как выполнить поэлементный баланс, как соотнести сигналы двух проводов элемента с сигналами трех проводов сети. Трансформатор с зигзагом позволяет перейти от трехфазной сети к двухфазной

$$u_x = u_{bc}/\sqrt{2} \qquad u_y = \sqrt{1.5}\cdot u_a \qquad i_x = i_{bc}/\sqrt{2} \qquad i_y = \sqrt{1.5}\cdot i_a. \tag{2}$$

Здесь $i_{bc} = i_b - i_c$ – линейный ток. Линейные преобразования к осям x, y

---

применяется в электрических машинах, но там они выполнены простой проекцией осей без трансформатора, из-за чего коэффициенты ошибочны, например, коэффициент 1.5 в уравнениях Парка-Горева. При правильных коэффициентах не только не изменяется величина полной мощности на разных сторонах трансформатора, но и сохраняются ее сомножители:

$$U_S^2 = U_x^2 + U_y^2 = U_a^2 + U_b^2 + U_c^2; \qquad I_S^2 = I_x^2 + I_y^2 = I_a^2 + I_b^2 + I_c^2. \tag{3}$$

В двухфазном варианте не учитывается влияние появившегося общего провода на полную мощность. Далее в порядке третьего способа [1] сперва взаимодействие напряжений.

Между двухфазной сетью и элементом подключается еще один фазоповоротный трансформатор с такими фазными коэффициентами трансформации, чтобы обеспечить в напряжении невязки

$$u'_k = u_k - K_{xu}\cdot u_x - K_{yu}\cdot u_y \tag{4}$$

отсутствие составляющих с формами напряжения сети. Для этого формулу (4) надо скалярно умножить на u_x и u_y.

$$0 = (u_x,u_k) - K_{xu}\cdot U_x^2 - K_{yu}\cdot(u_x,u_y) \qquad 0 = (u_y,u_k) - K_{xu}\cdot(u_x,u_y) - K_{yu}\cdot U_y^2; \tag{5}$$

$$K_{xu} = \frac{U_y^2\cdot(u_x,u_k) - (u_x,u_y)\cdot(u_y,u'_k)}{U_x^2\cdot U_y^2 - (u_x,u_y)^2} = \frac{[u_x,u_y]\cdot[u_k,u_y]}{[u_x,u_y]^2} = \frac{[u_k,u_y]}{[u_x,u_y]}; \tag{6}$$

$$K_{xu} = \frac{[u_k,u_x]}{[u_y,u_x]}. \tag{7}$$

Видно, как упрощается запись коэффициентов при использовании векторных произведений и их связей со скалярными (14) [1]. Видно также, что имеет право на жизнь отношение векторных произведений и оно реализуемо. Трансформатор передаст на первичную сторону токи:

$$i_{xu} = K_{xu}\cdot i_k\,; \qquad\qquad i_{yu} = K_{yu}\cdot i_k, \tag{8}$$

через которые аналогично (3) [1] определяется первая составляющая относительной мощности

$$S_{sku}^2 = U_S^2\cdot\{\ K_{xu}\cdot(i_x,i_k) + K_{yu}\cdot(i_y,i_k)\ \}, \tag{9}$$

Аналогично производятся действия с подключением идеального фазоповоротного трансформатора тока с коэффициентами трансформации, обеспечивающими отсутствие форм тока сети в токе невязки:

$$i'_k = i_k - K_{xi}\cdot i_x - K_{yi}\cdot i_y, \tag{10}$$

$$K_{xi} = \frac{[i_k,i_y]}{[i_x,i_y]}\,, \qquad\qquad K_{yi} = \frac{[i_k,i_x]}{[i_y,i_x]}\,; \tag{11}$$

$$S_{ski}^2 = I_S^2\cdot\{\ K_{xi}\cdot(u_x,u_k) + K_{yi}\cdot(u_y,u_k)\ \}. \tag{12}$$

Для удаления из напряжения элемента формы напряжения сети в однофазной сети потребовался сомнительный комплексный трансформатор, а в трехфазной – это удалось получить обычным трансформатором. Затем в однофазной сети применение трансформаторов тока и напряжения привело к одному результату, а в трехфазной формулы (9), (12) обеспечивают баланс по всей цепи, но дают разные значения для конкретного элемента. Да и несимметрия зависимости мощности от тока и напряжения появилась в формулах. При обрыве одной фазы, например формы оставшихся фазных токов совпадут, знаменатель в выражениях (11) обнулится и результаты расчетов по формулам (9), (12) будут отличаться в бесконечное число раз. Юмор состоит в том, что баланс по всей цепи выполнится, но «плюс бесконечная относительная мощность» одного элемента будет скомпенсирована «минус бесконечной мощностью» другого.

Для решения этого конфликта потребовался третий шаг. Формулы (9), (12) входят в общую формулу с долевыми коэффициентами, сумма которых равна единице, а величины перераспределяются в зависимости от знаменателей коэффициентов трансформации (6), (7), (11). Без пояснений были приняты следующие формулы:

$$D_u = \frac{[u_x,u_y]^2\cdot I_S^4}{[u_x,u_y]^2\cdot I_S^4 + [i_x,i_y]^2\cdot U_S^4}\,; \qquad D_i = \frac{[i_x,i_y]^2\cdot U_S^4}{[u_x,u_y]^2\cdot I_S^4 + [i_x,i_y]^2\cdot U_S^4}\,. \tag{13}$$

Далее знаменатель этой формулы обозначен D_{ui}. Если вернуться на трехфазную сторону, то получается следующая формула:

$$S_{skui}^2 = \frac{U_S^4\cdot I_S^4}{D_{ui}}\cdot\{\ (u_a,u_k)\cdot(i_a,i_k)\cdot\Big(1-\frac{U_a^2}{U_S^2}-\frac{I_a^2}{I_S^2}\Big)\ + \tag{14}$$
$$+\ (u_b,u_k)\cdot(i_b,i_k)\cdot\Big(1-\frac{U_b^2}{U_S^2}-\frac{I_b^2}{I_S^2}\Big)\ +\ (u_c,u_k)\cdot(i_c,i_k)\cdot\Big(1-\frac{U_c^2}{U_S^2}-\frac{I_c^2}{I_S^2}\Big)\ \}.$$

Формула (14) симметрична относительно токов и напряжений, не дает «дурных бесконечностей», но в ней нет баланса активных мощностей, что недопустимо.

Четвертым шагом является строгое следование по третьему способу [1], но с долевыми коэффициентами:

$$\begin{aligned}
S_{Sk}^2 &= S_{Skui}^2 + D_u\cdot\{\ [u_x,u'_k]\cdot[i_x,i_k] + [u_y,u'_k]\cdot[i_y,i_k]\ \} + \\
&\quad + D_i\cdot\{\ [u_x,u_k]\cdot[i_x,i'_k] + [u_y,u_k]\cdot[i_y,i'_k]\ \}\ = && \text{(а)}\\
&= S_{Skui}^2 + D_u\cdot\{\ K_{xu}\cdot[u_x,u_y]\cdot[i_y,i_k] + K_{yu}\cdot[u_y,u_x]\cdot[i_x,i_k]\ \} + && (15)\\
&\quad + D_i\cdot\{\ K_{xu}\cdot[i_x,i_y]\cdot[u_y,u_k] + K_{yi}\cdot[i_y,i_x]\cdot[u_x,u_k]\} + && \text{(б)}\\
&\quad + [u_x,u_k]\cdot[i_x,i_k] + [u_y,u_k]\cdot[i_y,i_k].
\end{aligned}$$

Если не считать громоздкости, формула (15) удовлетворяет всем требованиям. Можно раскрыть векторные произведения, тогда вместе с S_{Skui} формула будет содержать 14 + 1 членов вида

$$S_{Sk}^2 = K_1\cdot(u_x,u_k)\cdot(i_x,i_k) + \ldots + K_{14}\cdot(u_y,i_k)\cdot(i_y,u_k) + P_S\cdot P_k. \tag{16}$$

Коэффициенты $K_1 - K_{14}$ определяются только через параметры сети, возможны были бы 16 сочетаний, но отсутствуют два члена вида

$$(u_x,i_k)\cdot(i_y,u_k) \text{ и } (u_y,i_k)\cdot(i_x,u_k).$$

В таком изложении не совсем ясно, как была найдена пусть даже правильная формула (15а), а именно ее правая часть, которую можно назвать «активным расширением» формулы (14) из-за появления члена $P_S\cdot P_k$. В течении нескольких лет автор был уверен, что к трехфазной сети можно применить самый простой второй способ нахождения формулы через комплексы сети и элемента, что так просто получилось для однофазной сети [1]. Казалось логичным применение следующих систем мнимых единиц кватернионов и октав. Дополнительно пришлось сделать пятый шаг в развитии теории, дополнив понятие временной ортогонализации пространственной: в разных фазах даже совпадающие по форме сигналы ортогональны [3]. Действительно, уже в формуле (1) они в квадратуре входят в полную мощность. Но ничего не получалось, а получилось, когда не ясно как была написана в ортогональной форме формула, эквивалентная интегральной (15а), объяснить которую можно было только введением новой системы мнимых единиц. Эта система не удовлетворяет математическим требованиям, например, к кватернионам: «Произведение суммы четырех квадратов на сумму четырех квадратов есть снова сумма четырех квадратов». Для предложенной системы в однофазной сети получается

$$\dot{S} = \dot{U} \cdot \dot{I} = (U_1 \cdot j_1 + U_2 \cdot j_2 + \ldots + U_4 \cdot j_4) \cdot (I_1 \cdot j_1 + I_2 \cdot j_2 + \ldots + I_4 \cdot j_4) =$$
$$= -(U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2 + \ldots + U_4 \cdot I_4) + (U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1) \cdot j_{12} + (U_1 \cdot I_3 - U_3 \cdot I_1) \cdot j_{13} + \ldots + (U_3 \cdot I_4 - U_4 \cdot I_3) \cdot j_{34} \quad (17)$$

семь членов вместо четырех, причем, возможно, что произведения мнимых единиц дают новые единицы. Необходимые балансы сходятся

$$S_S^2 = (U_1 \cdot I_1 + \ldots + U_4 \cdot I_4)^2 + (U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1)^2 + \ldots + (U_3 \cdot I_4 - U_4 \cdot I_3)^2. \quad (18)$$

Для формулы (9б) [1] $S_{Sk}^2 = (u_S,i_S) \cdot (u_k,i_k) + [u_S,i_S] \cdot [u_k,i_k] = P_S \cdot P_k +$

$$+ (U_{S1} \cdot I_{S2} - U_{S2} \cdot I_{S1}) \cdot (U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1) + \ldots \ldots + (U_{S3} \cdot I_{S4} - U_{S4} \cdot I_{S3}) \cdot (U_3 \cdot I_4 - U_4 \cdot I_3). \quad (19)$$

А теперь ортогональная форма записи формулы (15а)

$$S_{Sk}^2 = S_{Skui} + D_u \cdot \{ P_S \cdot (U'_1 \cdot I_1 + U'_2 \cdot I_2 + U'_3 \cdot I_3 + U'_4 \cdot I_4) + (U_{x1} \cdot I_{x2} - U_{x2} \cdot I_{x1} + U_{y1} \cdot I_{y2} - U_{y2} \cdot I_{y1}) \cdot (U'_1 \cdot I_2 - U'_2 \cdot I_1) + (U_{x1} \cdot I_{x2} - U_{x2} \cdot I_{x1} + U_{y1} \cdot I_{y2} - U_{y2} \cdot I_{y1}) \cdot (U'_1 \cdot I_2 - U'_2 \cdot I_1) + \ldots \} + \quad (20)$$
$$+ D_i \cdot \{ P_S \cdot (U_1 \cdot I'_1 + U_2 \cdot I'_2 + U_3 \cdot I'_3 + U_4 \cdot I'_4) + (U_{x1} \cdot I_{x2} - U_{x2} \cdot I_{x1} + U_{y1} \cdot I_{y2} - U_{y2} \cdot I_{y1}) \cdot (U_1 \cdot I'_2 - U_2 \cdot I'_1) + \ldots \}.$$

Интересно, что может быть любое число ортогональных составляющих в формуле (19), число ортогональных балансов получается еще больше, но интегральная форма записи $[U_S,I_S] \cdot [U_k,I_k]$ остается в силе, как ее скалярное представление (14) [1].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лохов С.П. Относительные балансируемые энергетические составляющие полной мощности однофазной сети. (Статья в настоящем сборнике).

2. Лохов С.П. О разложении несимметричного несинусоидального изменяющегося тока на составляющие и определение понятия «коэффициент мощности»// Современные задачи преобразовательной техники. Ч.5. Киев: Изд-во АН УССР, 1975. С. 270-275.

3. Лохов С.П. Гиперкомплексные составляющие полной мощности в трехфазных цепях// Современные методы и средства быстродействующего преобразования режимных параметров энергосистем: Тез. Докл. НТК. Челябинск: УДНТП, 1990. С. 12-13.

Св. план 1996, поз. 2 ISBN 5-230-10716-2
Подписано в печать Формат 60x84 1/16 Бумага тип. N 2
Плоская печать Усл. Печ. Л. 8,15 Уч.-изд. л. 7,78 Тираж 100 экз.
Заказ 107 Цена С
Редакционно-издательский отдел МГМА им. Г.И.Носова
455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38