ТРУДЫ
ХАРЬКОВСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени В. И. ЛЕНИНА

Том XXVII, вып. 1 Серия электротехническая 1959

РАСЧЕТ ЗАМКНУТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ В ПУНКТАХ ПИТАНИЯ

И. Э. Раздовский

В работе приводится обоснование способа, который позволяет свести расчет токораспределения (потокораспределения) в замкнутой электрической сети с различными напряжениями в пунктах питания к случаю сети с одинаковыми напряжениями, что упрощает расчеты сети.

Расчет токораспределения, или распределения мощностей (потокораспределения) в замкнутой электрической сети упрощается, когда напряжения в пунктах ее питания одинаковы. В этом нетрудно убедиться, рассмотрев приводимый ниже пример. На рис. 1 показана последова-

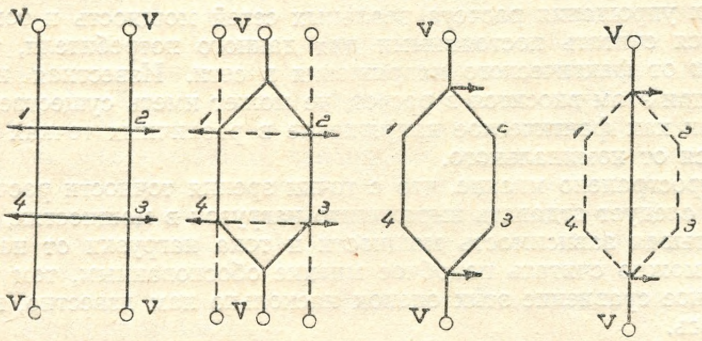

Рис. 1. Последовательность преобразований сети при одинаковых напряжениях в пунктах питания.

тельность преобразований несложной сети, при расчете ее методом преобразования, в случае одинаковых напряжений в пунктах питания. На рис. 2 показано то же, но при различных напряжениях в пунктах питания. Очевидно, во втором случае расчет сети сложнее, что становится особенно заметным при обратном ходе преобразований из-за необходимости перехода от схемы «треугольник» к «звезде».

Наличие одинаковых напряжений в пунктах питания представляет определенные преимущества и при расчете сетей с помощью сетевой модели. В частности, оно позволяет упростить конструкцию самой модели.

В этой связи возникла мысль свести расчет сети с различными напряжениями в пунктах ее питания к случаю с одинаковыми напряжениями в тех же пунктах. Ниже приводится несложное обоснование возможности такого решения вопроса.

Однако прежде чем перейти к существу дела, сделаем несколько замечаний по поводу расчетных нагрузок сети. Как известно, при расчете сетей применяются два вида выражения нагрузок: в единицах мощности и в единицах тока. Известно также, что мощность и ток нагрузки зависят от величины рабочего напряжения и поэтому, строго говоря, о стабильных значениях нагрузок можно говорить при условии, если они отнесены к определенному напряжению, обычно — к номинальному. Между тем, фактическое напряжение, на которое включается нагрузка в сети, естественно может отличаться от номинального и во всяком случае к началу расчета сети точное значение его неизвестно. По этой причине

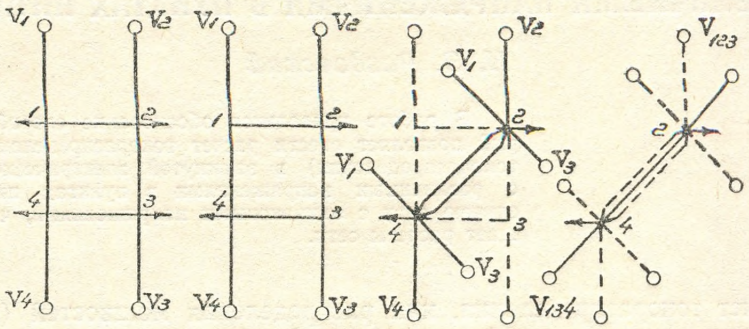

Рис. 2. Последовательность преобразований сети при различных напряжениях в пунктах питания.

и в целях упрощения расчета реальных сетей мощность и ток нагрузки приходится считать постоянными для данного потребителя, т. е. независимыми от фактического напряжения в сети. Известная неточность, которая при этом вносится в расчет, не может иметь существенного значения, так как фактическое напряжение в различных точках сети мало отличается от номинального.

Распространено мнение, что с точки зрения точности расчета, предпочтение следует отдавать выражению нагрузок в мощностях, а не в токах. Учитывая зависимость мощности и тока нагрузки от напряжения, вряд ли можно считать подобное мнение обоснованным, тем более, что специальное сравнение этих оценок насколько нам известно, не опубликовывалось.

Таким образом, если это не продиктовано удобствами расчета, либо другими подобными соображениями, то с одинаковым основанием нагрузки допустимо выражать как в мощностях, так и в токах, считая их постоянными и независимыми от возможных изменений напряжения в сети.

Перейдем непосредственно к решению поставленной задачи. С этой целью рассмотрим общий случай сети, содержащий n узлов. Будем считать заданными комплексами проводимости отдельных линий сети и величины напряжений в пунктах питания.

Примем, кроме того, в начале, что все нагрузки сети заданы в единицах тока также комплексами и разнесены по узлам.

Как известно, подобной сети соответствует определенная система уравнений для узловых напряжений, которая в матричной форме может быть записана в таком виде:

$$Y.\ U = I, \tag{1}$$

где Y, U и I — соответственно матрицы проводимостей, узловых напряжений и свободных членов.

Если матрица проводимостей задана в форме, когда ее диагональные элементы положительны, то для любого $к$-го узла ($к = 1, 2, \ldots n$), значение I определяется

$$\dot{I}_к = y_{ко} \cdot \dot{V}_к - i_к, \qquad (2)$$

где $y_{ко}$ — проводимость линии, которая непосредственно связывает $к$-й узел с пунктом питания сети (в дальнейшем, подобные линии и узлы будем называть магистральными);

$\dot{V}_к$ — напряжение к-го пункта питания;

$i_к$ — нагрузка узла.

Выберем некоторое произвольное напряжение $\dot{V}_0$ в качестве базисного и выразим через него напряжения пунктов питания сети, т. е. положим

$$\dot{V}_к = \dot{V}_0 + \Delta\dot{V}_к. \qquad (3)$$

На основании (3) можно представить (2) в виде

$$\dot{I}_к = y_{ко}\dot{V}_0 - (i_к - y_{ко} \cdot \Delta\dot{V}_к). \qquad (4)$$

Обозначим

$$\Delta i_к = y_{ко} \cdot \Delta\dot{V}_к;\ i_к^0 = i_к - \Delta i_к, \qquad (5)$$

после чего (4) может быть выражено так:

$$\dot{I}_к = y_{ко}\dot{V}_0 - i_к^0. \qquad (6)$$

Таким образом, введя в рассмотрение некоторое базисное напряжение V_0 можно выразить правую часть системы (1) в форме (6). Но очевидно, что в этом случае системе (1) будет соответствовать уже иная сеть, которая отличается от первоначально заданной не только тем, что все пункты ее питания имеют одинаковые напряжения, а именно V_0, но и тем, что в этой сети все магистральные узлы несут новые нагрузки $i_0^к$, определяемые (5), которые назовем приведенными нагрузками.

Поскольку при указанных изменениях узловые напряжения в сети сохраняют свои истинные значения, то очевидно, что и токораспределение между любыми узлами сети будет также соответствовать истинному. Что касается магистральных линейных токов, то их назначения будут отличаться от действительных.

В самом деле, для первоначально заданной сети величина $к$-го магистрального тока определяется

$$\dot{I}_{ко} = y_{ко}(\dot{V}_к - \dot{U}_к), \qquad (7)$$

где $\dot{U}_к$ — напряжение рассматриваемого узла.

В случае же приведения напряжений пунктов питания сети к базисному сответствующее приведенное значение магистрального тока будет

$$\dot{J}^0_{ко} = y_{ко}(\dot{V}_0 - \dot{U}_к). \qquad (8)$$

Сравнивая (7) и (8) и учитывая (3) и (5), найдем

$$\dot{J}^0_{ко} = \dot{J}_{ко} - \Delta i_к. \qquad (9)$$

Из сопоставления (5) и (9) нетрудно видеть, что приведенные значения магистральных нагрузок и магистральных линейных токов меньше действительных на одну и ту же величину, а именно, на $\Delta i_к = y_{ко} \cdot \Delta V_к$ что, очевидно, является естественным следствием первого закона Кирхгофа.

Таким образом, обобщая полученные результаты, нетрудно сделать следующий вывод. Любую замкнутую сеть с различными напряжениями

в пунктах питания можно рассчитывать как сеть с одинаковыми напряжениями в тех же пунктах, равными некоторому базисному, величина которого может быть выбрана произвольно. В этом случае все нагрузки магистральных узлов должны быть заменены приведенными, при неизменных нагрузках прочих узлов.

После расчета токораспределения в такой сети действительные значения магистральных линейных токов определяются с учетом поправок, как это следует из (9).

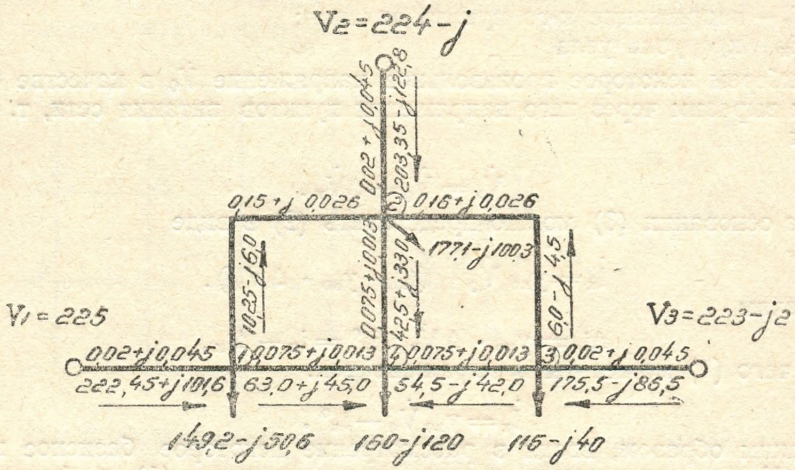

Рис. 3. Пример сети с различными напряжениями в пунктах питания. Токораспределение указано стрелками.

В заключение рассмотрим пример. Пусть требуется рассчитать сеть трехфазного тока с номинальным напряжением 380/220 *в*, изображенную на рис. 3. Напряжения пунктов питания различны; их фазовые значения (*в*) указаны на схеме. Там же нанесены сопротивления сетевых трансформаторов и отдельных линий сети (*ом*), приведенные к номинальному напряжению сети, а также узловые нагрузки (*а*).

В качестве базисного напряжения удобно выбрать напряжение пункта *3*. Таким образом, полагая $V_0 = 223 - j \cdot 2$, находим по (5)

$$\Delta i_1 = \frac{225 - (223 - j \cdot 2)}{0{,}02 + j \cdot 0{,}045} = 54{,}2 - j \cdot 20{,}6;$$

$$\Delta i_2 = \frac{224 - j - (223 - j \cdot 2)}{0{,}02 + j\,0{,}045} = 27{,}1 - j \cdot 10{,}3;$$

$$\Delta i_3 = 0.$$

Вычисляем приведенные нагрузки магистральных узлов:

$$i_1^0 = 149{,}2 - j \cdot 50{,}6 - (54{,}2 - j \cdot 20{,}6) = 95 - j \cdot 30;$$

$$i_2^0 = 177 - j \cdot 100{,}3 - (27{,}1 - j \cdot 10{,}3) = 150 - j \cdot 90;$$

$$i_3^0 = 115 - j \cdot 40 - 0 = 115 - j \cdot 40.$$

После этого получаем для расчета сеть с одинаковыми напряжениями в пунктах питания, равными $V_0 = 223 - j \cdot 2$ (см. рис. 4). Рассчитав эту сеть одним из известных методов расчета, находим токораспределение, которое указано на том же рисунке*. Для получения действительного токораспределения вносим поправки в найденные значения магистральных токов. Таким образом, будем иметь

* Расчет выполнен инж. Ю. И. Богомольцем.

$$\dot{J}_{10} = 168{,}25 - j \cdot 81 + 54{,}2 \quad j \cdot 20{,}6 = 222{,}45 - j \cdot 101{,}6;$$
$$\dot{J}_{20} = 176{,}25 - j \cdot 112{,}5 + 27{,}1 - j \cdot 10{,}3 = 203{,}35 - j \cdot 122{,}8;$$
$$\dot{J}_{30} = 175{,}5 \quad - j\,86{,}5 + 0 = 175{,}5 - j \cdot 85{,}5 .$$

Действительное токораспределение указано на рис. 3.

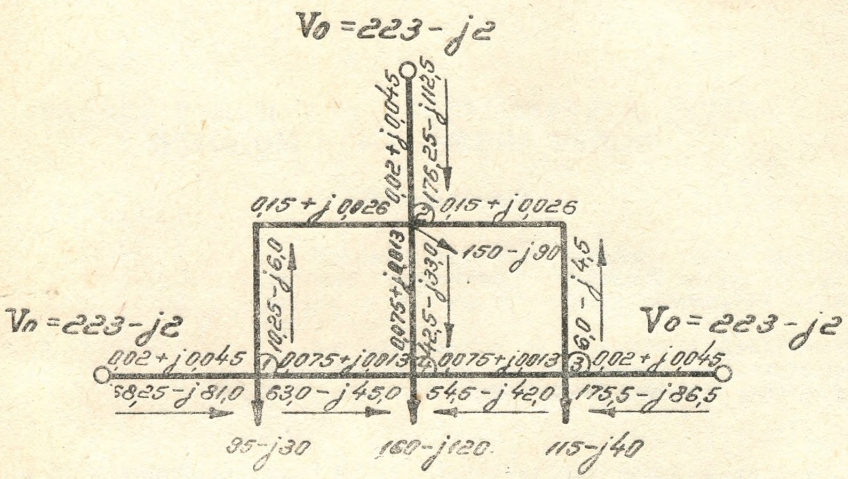

Рис. 4. Пример сети, приведенной к случаю одинаковых напряжений в пунктах питания. Токораспределение указано стрелками.

Рассмотрим теперь случай, когда нагрузка сети задана в единицах мощности. На основании предыдущего, ток нагрузки k-го узла определяется

$$\dot{I} = \frac{\dot{W}_к}{\sqrt{3} \cdot U_н}, \qquad (10)$$

где $W_к$ — комплекс мощности узла,
$U_н$ — линейное значение номинального напряжения сети.

Подставляя (10) в (4), будем иметь

$$\dot{I}_к = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U_н}\left[\sqrt{3} \cdot y_{ко} \dot{V}_0 \cdot U_н - \left(\dot{W}_к - \sqrt{3} \cdot y_{ко} \cdot \Delta \dot{V}_к U_н\right)\right]. \qquad (11)$$

Обозначая

$$\Delta \dot{W}_к = \sqrt{3} \cdot y_{ко} \cdot \Delta \dot{V}_к \cdot U_н \qquad (12)$$

и учитывая (10), получим для нагрузки k-го узла, приведенной к базисному напряжению,

$$\dot{W}_к^0 = \dot{W}_к - \Delta \dot{W}_к . \qquad (13)$$

По аналогии с предыдущим, приведенное значение магистрального потока мощности (без учета потерь мощности в сети) будет

$$\dot{W}_{ко}^0 = \dot{W}_{ко} - \Delta \dot{W}_к . \qquad (14)$$

Таким образом, и тут расчет ведется так же, как в том случае, когда нагрузки сети были заданы в единицах тока.