

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Г.И.ЯНУКОВИЧ, к. т. н., профессор, В.М.ЗБРОДЫГО, инженер БАТУ

По мере развития научно-технического прогресса увеличивается разнообразие способов применения электроэнергии, в том числе и таких, которые ведут к ухудшению ее качества. Т.е., ситуация в электроэнергетике складывается таким образом, что при производстве электроэнергии обеспечивается весьма высокое ее качество, а ухудшение качества связано с технологией, режимом и характеристиками отдельных приемников энергии (нелинейных, несимметричных, с резко и часто изменяющейся нагрузкой).

Несоблюдение нормируемых показателей качества электроэнергии ведет к материальному ущербу на предприятиях, оснащаемых все более тонкой и совершенной технологией с высокой степенью автоматизации производственных процессов. С другой стороны, ухудшение качества электроэнергии, как правило, сопровождается и ухудшением экономичности режима - увеличением потерь мощности и энергии в электрической сети и снижением ее пропускной способности.

Для определения потерь электроэнергии от некачественного напряжения рассмотрим наиболее общий случай искажающей трехфазной четырехпроводной системы, в которой система напряжений несимметрична, а фазные напряжения и токи несинусоидальны. Действительная полная мощность такой системы может быть задана выражением [1]:

$$S_d = T^{-1} \left[\int_0^T (U_A^2 + U_B^2 + U_C^2) dt \right] \left[\int_0^T (i_A^2 + i_B^2 + i_C^2 + n i_N^2) dt \right], \quad (1)$$

где U_A, U_B, U_C - мгновенные значения фазных напряжений вышеуказанной системы;

i_A, i_B, i_C - мгновенные значения токов в фазных проводах; i_N - мгновенное значение тока в нулевом проводе;

n - коэффициент, показывающий, во сколько раз сопротивление нулевого провода больше сопротивления фазного провода;

T - период времени интегрирования.

Очевидно, что в искажающей системе значение полной мощности зависит от степени несимметрии, неуравновешенности и несинусоидальности системы токов и напряжений. И хотя данное определение полной мощности основывается на реально существующей величине, каковыми являются тепловые потери, анализ полной мощности искажающей системы в общем случае приводит к нена-

глядным результатам.

Для упрощения анализа в выражении (1) мгновенные значения токов и напряжений заменим действующими значениями:

$$S_d^2 = (U_A^2 + U_B^2 + U_C^2)(i_A^2 + i_B^2 + i_C^2 + n i_N^2). \quad (2)$$

Сделаем допущение, что система токов является симметричной, уравновешенной и не содержит высших гармоник. В этом случае $I_A = I_B = I_C = I, I_N = 0$. Выражение (2) примет вид:

$$S_d^2 = 3I^2 (U_A^2 + U_B^2 + U_C^2). \quad (3)$$

Разложив действующие значения несинусоидальных напряжений на действующие значения основных гармоник ($U_{A(1)}, U_{B(1)}, U_{C(1)}$) и действующие значения высших гармоник (U_{Av}, U_{Bv} и U_{Cv} , соответственно), получим выражение полной мощности в искажающей четырехпроводной трехфазной системе в таком виде:

$$S_d^2 = 3I^2 \left(U_{A(1)}^2 + U_{B(1)}^2 + U_{C(1)}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Av}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Bv}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Cv}^2 \right), \quad (4)$$

где v - номер гармонической составляющей. Если далее сумму квадратов действующих значений основных гармоник напряжений $U_{A(1)}, U_{B(1)}, U_{C(1)}$ выразить с помощью составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей $U_{1(1)}, U_{2(1)}, U_{0(1)}$, то выражение (4) можно представить следующим образом:

$$S_d^2 = 3I^2 \left(3U_{1(1)}^2 + 3U_{2(1)}^2 + 3(3n+1)U_{0(1)}^2 \right) + 3I^2 \left[\sum_{v=2}^{\infty} U_{Av}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Bv}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Cv}^2 \right], \quad (5)$$

При этом мощность искажения, обусловленная наличием высших гармоник напряжения, будет равна:

$$S_{исх}^2 = 3I^2 \left[\sum_{v=2}^{\infty} U_{Av}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Bv}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Cv}^2 \right], \quad (6)$$

Учитывая выражение (6), действительную пол-

ную мощность трехфазной четырехпроводной искажающей системы можно записать в виде:

$$S_D^2 = S_1^2 + S_2^2 + (3n+1)S_0^2 + S_{иск}^2 \quad (7)$$

или

$$S_D^2 = P_1^2 + Q_1^2 + S_2^2 + (3n+1)S_0^2 + S_{иск}^2, \quad (8)$$

где P_1 и Q_1 - соответственно активная и реактивная составляющие полной мощности прямой последовательности;

$S_1 = 3IU_{1(1)}$ - полная мощность прямой последовательности основной частоты;

$S_2 = 3IU_{2(1)}$ - полная мощность обратной последовательности основной частоты;

$S_0 = 3IU_{0(1)}$ - полная мощность нулевой последовательности основной частоты.

Эта полная мощность искажающей системы характеризует ту наибольшую активную мощность P , которую можно было бы передать в неискажающей системе при тех же потерях в тех же сопротивлениях. Из выражения (8) следует, что передача активной мощности P_1 в искажающей системе сопровождается протеканием не только реактивной мощности Q_1 , но и мощности обратной последовательности S_2 , вызванной несимметрией потребления, мощности нулевой последовательности S_0 , вызванной неуравновешенностью потребления, и мощности искажения $S_{иск}$, вызванной присутствием высших гармоник в системе напряжений. Кроме активной мощности P_1 все остальные перечисленные мощности являются мощностями, увеличивающими потери в сопротивлениях системы и ограничивающими тем самым ее пропускную способность. Отсюда можно сделать вывод, что величина Q

$$Q^2 = Q_1^2 + S_2^2 + (3n+1)S_0^2 + S_{иск}^2 \quad (9)$$

представляет собой так называемую эквивалентную реактивную мощность, связанную с полной мощностью соотношением:

$$S_D^2 = P_1^2 + Q^2. \quad (10)$$

Трехфазный коэффициент несинусоидальности напряжений будет равен:

$$K_{нсU}^2 = \frac{\sum_{v=2}^{\infty} U_{Av}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Bv}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Cv}^2}{U_{A(1)}^2 + U_{B(1)}^2 + U_{C(1)}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Av}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Bv}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Cv}^2}. \quad (11)$$

Умножим числитель и знаменатель выражения (11) на величину $3I^2$:

$$K_{нсU}^2 = \frac{3I^2 \left(\sum_{v=2}^{\infty} U_{Av}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Bv}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Cv}^2 \right)}{3I^2 \left(U_{A(1)}^2 + U_{B(1)}^2 + U_{C(1)}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Av}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Bv}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{Cv}^2 \right)}. \quad (12)$$

С учетом выражений (4) и (6) получим:

$$K_{нсU}^2 = \frac{S_{иск}^2}{S_D^2}, \quad (13)$$

или

$$S_{иск} = K_{нсU} S_D. \quad (14)$$

Следует заметить, что подавляющее большинство приборов позволяет измерять не трехфазный, а однофазный коэффициент несинусоидальности напряжения. Так как однофазный коэффициент несинусоидальности напряжения равен отношению действующего значения напряжений высших гармоник к действующему значению напряжения в данной фазе, то трехфазный коэффициент несинусоидальности напряжения можно выразить через однофазные:

$$K_{нсU}^2 = \frac{K_{нсUA}^2 U_A^2 + K_{нсUB}^2 U_B^2 + K_{нсUC}^2 U_C^2}{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2}, \quad (15)$$

где $K_{нсUA}$, $K_{нсUB}$, $K_{нсUC}$ - коэффициенты несинусоидальности фазных напряжений.

В результате вышеописанных преобразований нами получено выражение (14) для определения дополнительных потерь мощности в электрической сети, обусловленных несинусоидальностью сетевого напряжения. И хотя сделанное нами допущение о том, что система токов симметрична и синусоидальна, вносит некоторую погрешность в результаты расчетов, это выражение просто и может быть использовано на практике.

Определив потери мощности от несинусоидального напряжения, можно, на основе технико-экономических расчетов и с учетом убытков потребителей от низкого его качества, сделать выводы о степени целесообразности проведения тех или иных мероприятий по повышению качества электроэнергии. В частности, снижение несинусоидальности напряжения обеспечивается либо рациональным построением схемы электрической сети, либо применением специальных схем присоединения нелинейных нагрузок, либо использованием корректирующих устройств [2]. На практике, как правило, сочетают различные методы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Дрехслер. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. - М.: Энергоатомиздат, 1985, 112 с.
2. И. В. Жежеленко. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. - М.: Энергоатомиздат, 1986, 168 с.