

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С НЕСИММЕТРИЧНЫМИ И НЕСТАБИЛЬНЫМИ НАГРУЗКАМИ

Электротермические установки (ЭТУ) являются одним из основных видов приемников электроэнергии. Они широко используются в черной и цветной металлургии, в машиностроении, сельском хозяйстве, в химической и легкой промышленности, для производства монокристаллов полупроводниковых материалов и т.д. Наиболее мощными установками трехфазного тока из них являются дуговые сталеплавильные и руднотермические печи, работающие в несимметричных режимах.

В общем случае несимметричный режим может вызываться несимметрией питающей системы (источника) и потребителей электрической энергии.

В первом случае симметрирование сводится к обеспечению симметрии напряжений на зажимах трехфазного потребителя, питаемого от несимметричной системы напряжений.

Во втором случае задача состоит в обеспечении симметрии токов в фазах сети при подключении к ней несимметричной нагрузки. Этот случай имеет большое практическое значение в связи с тем, что для ЭТУ, в особенности ДСП, при симметричном питающем напряжении, равных токах и активных сопротивлениях фаз активные мощности дуг оказываются тем не менее различными. Это вызывается несимметрией короткой сети, неодинаковой взаимоиндуктивностью фаз (крайних друг с другом и крайних со средней) и приводит к явлению переноса мощности из одной крайней фазы в другую, так называемые «дикая» и «мертвая» фазы. Это явление почти не заметно у печей малой мощности, но является существенным для крупных печей и отрицательно влияет на технико-экономические показатели установок.

В качестве примера на рис. 1 приведен процесс начала образования дуг в трехфазной дуговой сталеплавильной печи с непроводящей подиной. Токи дуг фаз $I_{1\partial}$, $I_{2\partial}$ и $I_{3\partial}$ показаны на осциллограмме сверху вниз.

Внизу расположена линия времени, разбитая на отрезки, равные 1 секунде. На участке осциллограммы *a* токи дуг всех трех фаз отсутствуют. Моменты зажигания дуги на втором и третьем электродами отображены на участке *б*.

Анализируя осциллограмму, видно, что все дуги горят только начиная с участка *ж*.

Несимметрию трехфазных токов можно охарактеризовать коэффициентом несимметрии, определяемым как отношение модуля составляющей обратной последовательности к модулю составляющей

прямой последовательности и принимающего значения для тока от 0 до 16% [1].

Рассмотрим некоторые возможные определения полной мощности в трехфазной системе, учитывая отмеченные особенности ЭТУ.

В трехфазной системе полная мощность традиционно определяется как произведение действующего значения тока, протекающего через нагрузку, и действующего значения напряжения на ее выводах, т.е. для трехфазной сети

$$S = 3UI = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (1)$$

где P и Q – активная и реактивная мощность нагрузки. При этом предполагается, что напряжение и ток не содержат высших гармоник.

Наиболее часто при расчете полной мощности в несимметричных режимах используют, так называемую алгебраическую полную мощность, определяемую выражением

$$S_{алг} = S_A + S_B + S_C, \quad (2)$$

т.е. представляет собой сумму полных мощностей S_A , S_B , S_C отдельных фаз А, В и С.

Другой модификацией полной мощности, часто используемой на практике для оценки потребления электрической энергии, является так называемая геометрическая полная мощность [2], определяемая выражением

$$S_{геом} = \sqrt{(P_A + P_B + P_C)^2 + (Q_A + Q_B + Q_C)^2}. \quad (3)$$

Геометрическая полная мощность представляет собой геометрическую сумму алгебраической суммы активных фазных мощностей $P_A + P_B + P_C$ и алгебраической суммы реактивных фазных мощностей $Q_A + Q_B + Q_C$.

Если полную мощность измерить с помощью двух трехфазных счетчиков – для активного и реактивного токов, тогда $S_{геом} \leq S_{алг}$.

Используется также такое определение полной мощности, как

$$S_D = \sqrt{(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2)(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)}. \quad (4)$$

В [2] называют такую полную мощность действительной.

При детерминированном характере информации нагрузки задаются фиксированными значениями. Неполное соответствие детерминированных моделей реальным процессам привело к использованию статистически накопленной информации о различных режимах работы системы.

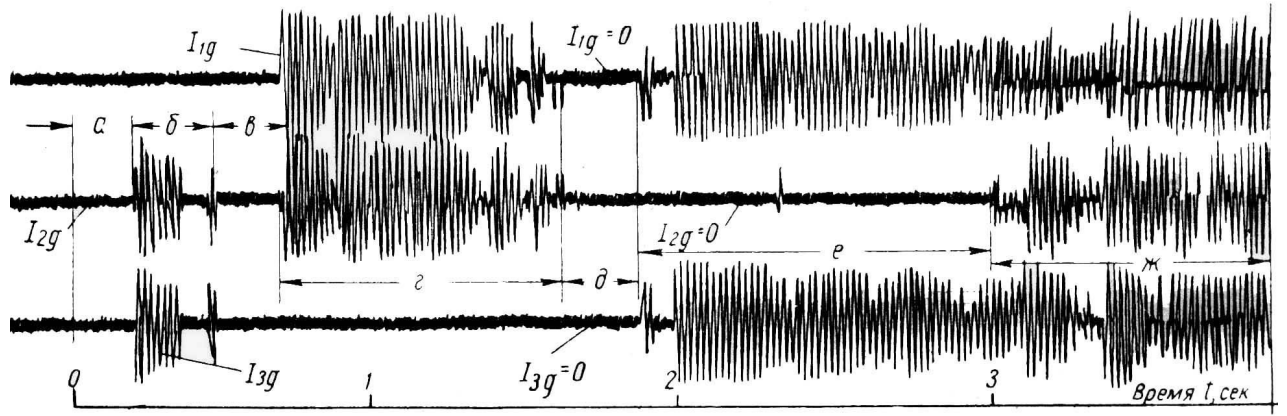


Рис. 1. Осциллограмма токов трехфазной дуговой печи

Исследования, проведенные на печах емкостью 5 и 8 т, показали, что, например, в период расплавления толчки тока со средней величиной около 150% номинальной занимают 15-20% длительности периода расплавления, толчки тока со средней величиной около 200% номинального 3-5%, а 2,5-кратные толчки тока – 0,5-1% этого времени. Используя эти цифры для учета влияния толчков тока на характеристики печи, можно записать для действующих значений последних следующие выражения [3]:

$$I_D = 0,74I + 0,2(1,5I) + 0,05(2,0I) + 0,01(2,5I) = 1,165I. \quad (5)$$

Тогда полную мощность в трехфазной системе можно найти по выражению

$$S = 3UI_D \quad (6)$$

или по аналогии с (4) как

$$S'_D = \sqrt{(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2)(I_{AD}^2 + I_{BD}^2 + I_{CD}^2)}, \quad (7)$$

где I_{AD} , I_{BD} , I_{CD} - действующие значения тока фаз А, В и С.

Наличие в контурах ЭТУ нелинейных элементов является одной из причин появления высших гармонических токов и напряжений в электрических сетях, питающих эти установки. К элементам такого рода относятся электрические дуги ДСП и РТП; выпрямительные агрегаты установок вакуумных дуговых печей; статические преобразователи частоты установок индукционных печей; тиристорные блоки со встречно-параллельным включением вентилей для регулирования мощностей печей сопротивления и индукционных печей; печные трансформаторные агрегаты.

В печных трансформаторах ДСП и РТП обмотки вторичного напряжения соединены в треугольник, поэтому в токе при симметричной нагрузке не содержится гармоник, кратных трем. Однако параметры электрических цепей ЭТУ несимметричны и содержат, как минимум, третью гармонику (значение амплитуды которой достигает до 15% по отношению к первой). Как показали результаты многочисленных исследований, ЭТУ генерируют 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13 гармоники.

Поэтому, если разложить действующие значения несинусоидальных токов на действующие значения основных гармоник и действующие значения высших гармоник, то выражение для полной мощности в искажающей трехпроводной системе имеет вид:

$$S_D^2 = 3U^2(I_{A1}^2 + I_{B1}^2 + I_{C1}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{Av}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{Bv}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{Cv}^2), \quad (8)$$

где I_{A1} , I_{B1} , I_{C1} - действующие значения основных гармоник тока; I_{Av} , I_{Bv} , I_{Cv} - действующие значения высших гармоник тока.

Для научных расчетов достаточно ограничиться 9 гармоникой, для инженерных - 5.

Несимметричную трехфазную систему токов I_A , I_B и I_C можно разложить на симметричные составляющие токов прямой, обратной и нулевой последовательности I_1 , I_2 , I_0 .

В настоящее время практически все ДСП и РТП имеют непроводящую подину и работают без нулевого провода, т.е. нулевая составляющая отсутствует. Поэтому можно записать

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C); \\ I_2 &= \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C); \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ - фазовый оператор.

Тогда полная мощность в трехфазной трехпроводной системе имеет вид:

$$S_D^2 = 3U^2(3I_1^2 + 3I_2^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{Av}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{Bv}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{Cv}^2). \quad (10)$$

Если мощность искажения выразить уравнением

$$D^2 = 3U^2 \left(\sum_{v=2}^{\infty} I_{Av}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{Bv}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{Cv}^2 \right), \quad (11)$$

то полную мощность можно найти как

$$S_D = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + D^2} \quad (12)$$

или иначе

$$S_{\Sigma} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}. \quad (13)$$

или

$$S'_{\Sigma_{\text{geom}}} = \left[(P_A + P_B + P_C)^2 + (Q_A + Q_B + Q_C)^2 + (D_A + D_B + D_C)^2 \right]^{1/2}. \quad (14)$$

Методику расчета по формулам (1)-(14) можно применять как для одиночных ЭТУ, так и для групп.

Для расчета действующих значений тока группы ЭТУ был применен метод, предложенный в [4, 5] (сохранены обозначения автора).

В этом случае относительное действующее значение первичного тока на входе групповой структуры определяется выражением

$$I_{1\Sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{k=1}^P \left[\left(\sum_{q=1}^L \sum_{i=1}^n A_{(k)qi} \right)^2 + \left(\sum_{q=1}^L \sum_{i=1}^n B_{(k)qi} \right)^2 \right]}, \quad (15)$$

где $A_{(k)qi}$, $B_{(k)qi}$ - косинусный и синусный коэффициенты Фурье входных токов i -х источников питания и q -х групп.

Суммы вида $\sum_{q=1}^L \sum_{i=1}^n A_{(k)qi}$ и $\sum_{q=1}^L \sum_{i=1}^n B_{(k)qi}$ могут

быть найдены при любом сочетании групп $q \in \{1...L\}$ и источников $i \in \{1...n\}$, а также при разном образии режимов работы и видов нагрузок эквивалентных и разнотипных i -х источников питания. Точность расчетов устанавливается выбором необходимого числа p первых (более низких) гармоник тока, т.е. $k \in \{1...P\}$ и видом аналитических приближений (аппроксимаций) при формировании коэффициентов Фурье.

Тогда полная мощность S_{Σ} для трехфазной несимметричной системы без нулевого провода

$$S_{\Sigma}^2 = \frac{3}{2} U^2 \sum_{S=A,B,C} \left\{ \sum_{k=1}^P \left[\left(\sum_{i=1}^n A_{(k)Si} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n B_{(k)Si} \right)^2 \right] \right\}, \quad (16)$$

где $A_{(k)Si}$, $B_{(k)Si}$ - соответственно косинусный и синусный коэффициенты разложения Фурье тока S -й фазы, k -й гармоники, i -го источника питания.

Из-за большого числа случайных факторов, действующих на ток ЭТУ, для исследований колебаний токов широко применяют вероятностные методы, заменяющие описание большого числа эмпирических данных на небольшое число характеристик, которые содержат существенную информацию о процессе, и позволяет довольно точно предсказать поведение ЭТУ как объекта со случайной природой электрической нагрузки [6, 7].

Основными вероятностными характеристиками являются математическое ожидание и дисперсия. При допущении о нормальности случайных процессов графиков нагрузки $P(t)$ и $Q(t)$, для тока нагрузки эти параметры могут быть записаны в виде следующих выражений:

$$m_I = \frac{1}{\sqrt{3}U} \left[(m_P^2 + m_Q^2)^2 + 2m_P m_Q \left(\frac{m_Q}{m_P} DP + \frac{m_P}{m_Q} DQ - RPQ \right) + 2(DP \cdot DQ - RPQ^2) \right]^{1/4};$$

$$D_I = \frac{1}{3U^2} [m_P^2 + DP + m_Q^2 + DQ] - m_I^2,$$

где m_P , m_Q , DP , DQ - математические ожидания и дисперсии соответственно активной и реактивной мощностей; RPQ - коэффициент взаимной корреляции этих процессов.

Для нахождения дисперсий и математических ожиданий используются графики активной $P(t)$ и реактивной нагрузки $Q(t)$, получаемые путем хронометража технологического процесса. В качестве примера на рис. 2 приведен индивидуальный график нагрузки ДСП-6 за цикл плавки с шагом дискретизации 3 мин.

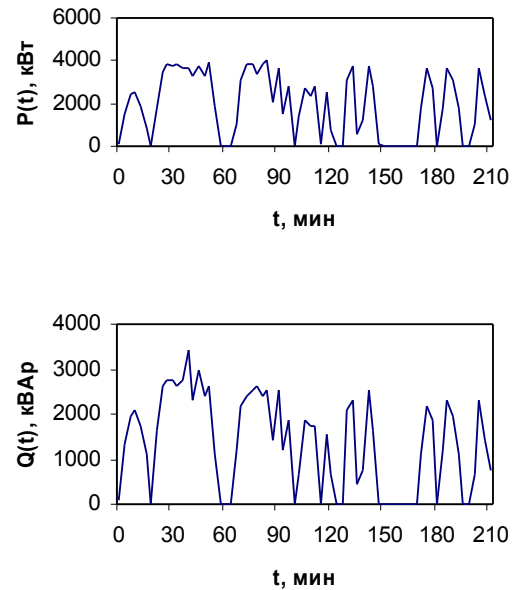


Рис. 2. График электрической нагрузки активной и реактивной мощностей ДСП-6

Ток при коэффициенте вариации нагрузки $V_I = \frac{\sqrt{D_I}}{m_I} \leq 0,1$ определяется следующим выражением

$$I_{\Sigma} = m_I \sqrt{1 + 17,4V_I^2}. \quad (17)$$

По полученному значению эквивалентного тока определяется полная мощность

$$S = 3UI_{\text{эк}}. \quad (18)$$

Данные расчеты приведены для неизменной во времени температуры окружающей среды. В реальных условиях имеют место как суточные, так и годовые колебания температуры.

Поэтому выражение для тока запишется в виде

$$I_{\text{эк}} = m_I \sqrt{\frac{78}{\theta_{\text{эк}}} + 17,4V_I^2}, \quad (19)$$

где $\theta_{\text{эк}}$ - эквивалентная температура нагрева трансформатора.

Так как печные трансформаторы находятся, как правило, в отдельном помещении, то имеют место медленные колебания температуры окружающей среды. Поэтому с погрешностью не более 1,5% колебаниями температуры можно пренебречь и эквивалентную температуру рассчитывать по выражению

$$\theta_{\text{эк}} = 98 - \vartheta_{\text{ср}},$$

где $\vartheta_{\text{ср}}$ - среднегодовая температура.

При среднегодовой температуре в помещении трансформатора 20°C выражения (17) и (19) становятся эквивалентными, а изменение температуры обмоток трансформатора определяется изменением токовой нагрузки.

Рассчитанные значения полной мощности для ДСП-6 с печным трансформатором мощностью 4000 кВА сведены в таб. 1.

Таб. 1. Рассчитанные значения полной мощности для ДСП-6

№ п/п	Полная мощность	№ формулы	Полная мощность, S, кВА
1.	Традиционное выражение	1	4000,7
2.	Алгебраическая или геометрическая	2, 3	3947,5
3.	Действительная	4	3908,2
4.	Действительная с учетом влияния толчков тока	6	4660,8
5.	То же при учете несимметрии токов фаз	7	4218,3
6.	Действительная с учетом гармоник тока	8 или 10, 12	3546,7
7.	Действительная с учетом мощности искажения	13	4085,3
8.	Действительная с учетом мощности искажения	14	4033,2
9.	Действительная, выраженная через коэффициенты Фурье	16	3899,8
10.	Мощность, рассчитанная вероятностными методами	18	4081,1

Выводы.

1. Использование выражений (1)-(16) на практике приводит к неоправданному завышению электрических нагрузок. В результате увеличиваются расход цветного металла, потери электроэнергии, капитальные вложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Минеев Р.В., Михеев А.П., Рыжнев Ю.Л. Повышение эффективности электроснабжения электропечей. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208с.
2. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. Пер. с чешск. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112с.
3. Свенчанский А.Д., Смелянский М.Я. Электрические промышленные печи. Ч.2. Дуговые печи. – М.: Энергия, 1970. – 264с.
4. Синолицы А.Ф., Лазаревич А.Г. Энергетические характеристики многодвигательного вентильного электропривода с комбинированной коммутацией //Современные проблемы преобразовательной техники. – Киев: Наук. думка, 1980. – С. 94-103.
5. Синолицы А.Ф. Энергетические зависимости групповых преобразовательных устройств //Техн. электродинамика. – 1998. - №1. – С.30-34.
6. Гродских С.Х. О методике определения электрических нагрузок промышленных предприятий //Промышленная энергетика. – 1979. – №10. – С.16-18.
7. Степанов В.П., Жежеленко И.В. О причинах завышения расчетных нагрузок по нагреву //Промышленная энергетика. – 1984. - №10. С.35-37.