

УДК 621.311.001.57: 621.365.22

М.Ю. ЗАЛУЖНЫЙ
Запорожский национальный технический университет
Zaluzhny m@ukr.net

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ В ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Предложена компьютерная модель сталеплавильного комплекса, позволяющая исследовать влияния совместной работы дуговых сталеплавильных печей на электромагнитные процессы в электротехническом оборудовании и системе электроснабжения комплекса. Показано, что потери электрической энергии увеличиваются по нелинейному закону с ростом несинусоидальности тока в обеих сталеплавильных печах.

Ключевые слова: моделирование, потери электрической энергии, электротехнологический комплекс, дуговая сталеплавильная печь, нелинейность, несинусоидальность тока.

В настоящее время доля стали, выплавляемой в дуговых сталеплавильных печах, в объеме мировой выплавки стали превышает 30%. Увеличение выплавки сопровождается ростом вместимости печей, которая достигает 200 тонн. Их питание осуществляется от высоковольтных линий электропередач напряжением 100-330кВ, через понижающие подстанции 35кВ и непосредственно от электропечных трансформаторов. Потребляемая мощность достигает 100 - 200МВА.

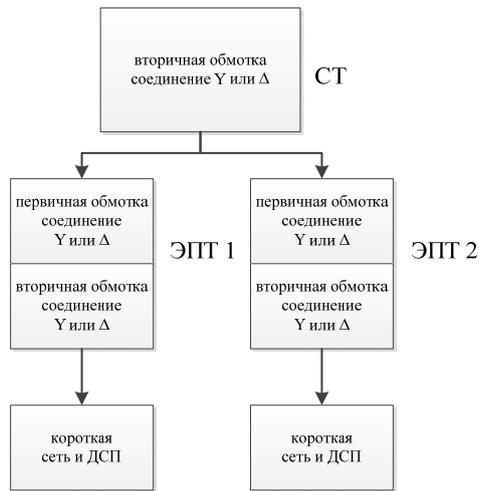
Ввиду особенностей электротехнологических режимов работы сталеплавильного комплекса дуговая печь является источником резкопеременных нагрузок. Работа дуговых сталеплавильных печей с нестабильным потреблением реактивной мощности сопровождается возникновением в электрической сети колебаний напряжения, а нелинейность и несимметрия фазных токов, потребляемых печью, приводит к несинусоидальности тока, несимметрии напряжения [1-3].

Энергосберегающие электротехнологии и вопросы научно обоснованного оптимального использования электрической энергии являются одним из приоритетных направлений технической политики стран мирового экономического содружества. Первостепенным требованием является снижение энергетических потерь при оптимальной энергоёмкости и энергоэффективности электротехнического и электротехнологического оборудования [1-2]. Даже незначительное снижение потерь электроэнергии в единице оборудования приводит к существенному увеличению экономических показателей в системе.

Вопросам исследования влияния дуговых сталеплавильных печей на качество электроэнергии, электромагнитной совместимости, компенсации реактивной мощности и высших гармоник посвящено большое количество научных работ [1-3]. Однако существующие методы позволяют учитывать влияние отдельных факторов или явлений. Они основаны либо на осредненных или завышенных данных, либо на полуэмпирических коэффициентах. Расчеты электромагнитных параметров решаемой задачи выполняются разными методами в зависимости от необходимой степени точности. Наиболее приемлемые результаты могут быть получены при одновременном учете несинусоидальности и несимметрии токов и напряжений. Однако такие расчеты сложны, особенно для несимметричных цепей. Таким образом, исследования электромагнитных процессов требуют дальнейших исследований.

Целью данной статьи является исследование влияния несинусоидальности токов на потери электрической энергии на стороне 35 кВ электротехнологического комплекса при совместной работе двух дуговых сталеплавильных печей, с различными схемами соединения обмоток сетевого и электропечных трансформаторов.

Наиболее достоверные результаты исследования влияния несинусоидальности тока на потери электрической энергии могут быть получены методами физического моделирования. Однако в виду больших материальных и ресурсных затрат использование такого вида моделирования в настоящее время существенно ограничено. Поэтому наиболее эффективной усматривается разработка и практическая реализация методик компьютерного моделирования потерь электрической энергии. Компьютерная модель должна отображать основные электромагнитные процессы, протекающие в сталеплавильном комплексе. Структурная схема разработанной компьютерной модели показана на рис. 1. Она содержит источник питания, электропечные трансформаторы, короткую сеть и дуговой промежуток, который представляет собой нелинейную нагрузку и является формирователем несинусоидальности и несимметрии токов. В зависимости от поставленной задачи электропечной трансформатор и дуговой промежуток могут быть представлены как в виде простейшего нелинейного элемента (без учета процессов в ней, только по вольтамперным характеристикам), так и в виде сложной системы, позволяющей более полно учитывать взаимосвязи между протекающими электромагнитными процессами [4-5].



СТ – сетевой трансформатор
 ЭПТ – электропечной трансформатор
 Рисунок 1 – Структурная схема модели
 сталеплавильного комплекса

Поскольку дуговая сталеплавильная печь представляет собой нелинейный элемент, который является источником высших гармоник, то определяющей задачей является описание его математической моделью. Она должна как можно реальнее отображать процессы, протекающие в дуговом промежутке. Для решения этой задачи воспользуемся уравнением Касси, которое описывает нелинейные взаимосвязи между напряжением, током и проводимостью дуговой сталеплавильной печи [4-5]. Для решения данной задачи уравнение удобно использовать в канонической форме

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{i^2}{U_d^2 g} - g \right), \quad (1)$$

где U_d – действующее значение напряжения; i – мгновенное значение тока; θ – постоянная времени дуги; g – проводимость дуги.

В диапазоне температур 4000–16000К зависимость постоянной времени дуги θ можно разделить на два участка и описать следующими полиномиальными зависимостями:

$$\theta = \begin{cases} -3.2185 \cdot 10^{-14} T^3 + 6.9664 \cdot 10^{-10} T^2 - 5.016 \cdot 10^{-6} T + 1.2022 \cdot 10^{-2} \text{ при } 4000 < T \leq 8000\text{K} \\ 2.6589 \cdot 10^{-22} T^4 - 1.5258 \cdot 10^{-17} T^3 + 3.27 \cdot 10^{-13} T^2 - 3.1 \cdot 10^{-9} T + 1.1 \cdot 10^{-5} \text{ при } 8000 < T \leq 16000\text{K} \end{cases} \quad (2)$$

Моделирование потерь электрической мощности от несинусоидальности тока выполнялись при совместной работе двух сталеплавильных печей емкостью 50 тонн и различных соединениях обмоток сетевого и электропечных трансформаторов. Моделировались следующие режимы, в которых во второй печи устанавливалась несинусоидальность тока равная $k_{f\Pi 2}=0; 9.82; 18.82; 27.93; 52.51; 78\%$, а в первой печи изменялась в диапазоне 0-78%.

Полученные результаты при компьютерном моделировании представим в относительных единицах в соответствии со следующей зависимостью:

$$\Delta S(k_{f\Pi j}) = \frac{S_{\Sigma}(k_{f\Pi j})}{S_{\sim}} \Bigg|_{\substack{U_H = \text{const} \\ I_{d\Pi j} = \text{const} \\ k_n = 0}}, \quad (3)$$

где k_{f_i} – коэффициент несинусоидальности тока; k_n – коэффициент несимметрии; I_d – действующее значение тока в короткой сети дуговой сталеплавильной печи; U_H – номинальное напряжение сетевого трансформатора; индексы « Σ » и « \sim » обозначают, что потери получены при несинусоидальном и синусоидальном токах, соответственно; « Πj » – обозначают принадлежность соответствующих параметров к j-ому номеру электросталеплавильной печи.

В качестве примера на рисунке 2 показаны результаты компьютерного моделирования приращения потерь в зависимости от коэффициента несинусоидальности тока в первой печи для наиболее распространенной схемы соединения обмоток электропечного трансформатора. На рисунке приняты следующие обозначения: кривые 1-6 получены при $k_{f\Pi 2}=0; 9.82; 18.82; 27.93; 52.51; 78\%$, соответственно; точки «А», «В» и «С» – характерные экстремумы. Из полученных результатов следует, что характер изменения приращения потерь не зависит от схем соединения обмоток сетевого и электропечных трансформаторов при совместной работе двух сталеплавильных печей. На всех полученных зависимостях присутствуют характерные экстремумы (см. рис. 2 точки А,В,С). Максимальная разница между приращением потерь, при различных схемах соединения обмоток трансформатора, не превышает 9% для несинусоидальности до 60%. Из рис. 2 видно, что потери электрической энергии в электротехнологическом комплексе в зависимости от несинусоидальности тока изменяются по сложному нелинейному закону. При этом при совместной работе двух печей наблюдаются максимумы (точка В). Эти максимумы поясняются тем, что в соответствующих режимах гармоники тока в обеих сталеплавильных печах совпадают. До (точка А) и после (точка С) максимумов имеет место уменьшение потерь. Это позволяет аппроксимировать следующей полиномиальной зависимостью:

$$\Delta S(k_{f\Pi 1}) = \sum_{j=1}^n a_j \cdot k_{f\Pi 1}^j + a_0 \Bigg|_{k_{f\Pi 2} = \text{const}}, \quad (4)$$

где a_j – коэффициент полинома.

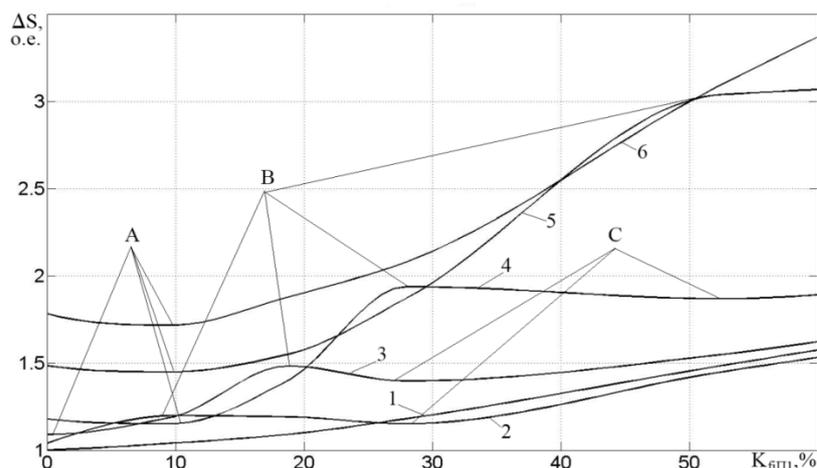


Рисунок 2 – Приращение полных потерь в сталеплавильном комплексе в зависимости от коэффициента несинусоидальности тока при совместной работе двух сталеплавильных печей и схеме соединения обмоток электропечных трансформаторов в Y/Δ

В табл. 1 приведены коэффициенты полиномиальных зависимостей, описывающих приращения потерь на стороне 35 кВ при совместной работе двух дуговых сталеплавильных печей. Порядковые номера, указанные в первом столбце, соответствуют кривым на рис. 2.

Таблица 1 – Коэффициенты полиномиальных зависимостей.

№	a9	a8	a7	a6	a5	a4	a3	a2	a1	a0
1						-1.4649e-8	-4.301e-7	2.3542 e-4	2.9165 e-4	1.0093
2				1.789e-10	-3.036e-8	1.4284e-6	8.3695e-6	-0.0018077	0.032753	1.0349
3	6.567e-14	-2.16e-11	2.9645e-9	-2.191e-7	9.3626e-6	-0.0002299	0.0030003	-0.017155	0.040522	1.0755
4	-1.24e-12	1.98e-10	-1.751e-8	9.3201e-7	-3.033e-5	0.00058554	-0.0062209	0.032965	-0.072287	1.2
5	-4.39e-15	5.033e-13	4.72e-11	-1.058e-8	6.7942e-7	-2.1228e-5	0.00036272	-0.0024586	0.00074442	1.4951
6			-1.463e-12	3.561e-10	-2.8713e-8	6.9347e-7	4.6832e-6	0.00061748	-0.013531	1.77

Анализ полученных результатов позволяет сформулировать следующие **выводы**:

1. Разработанная компьютерная модель позволяет исследовать влияние несинусоидальности тока на потери электрической энергии на стороне 35 кВ сталеплавильного комплекса при совместной работе группы сталеплавильных печей и различных соединениях обмоток сетевого и электропечного трансформаторов.

2. Различные схемы соединения обмоток сетевого и электропечного трансформаторов не влияют на характер изменения зависимости приращения потерь от коэффициента несинусоидальности тока. При этом наибольшее расхождение не превышает 9% при схемах соединения обмоток электропечных трансформаторов в первом случае Δ/Δ , а во втором Y/Δ .

3. Анализ полученных результатов показал, что при инженерных расчетах директивных режимов группы дуговых сталеплавильных печей целесообразно скорректировать с учетом влияния несинусоидальности тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шидловский А.К. Повышение качества энергии в электрических цепях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. - К.: Наук. Думка, 1985. - 268 с.
2. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
3. Зиновкин В.В. Многопараметрический анализ совокупности параметров резкопеременных нагрузок и электромагнитных процессов в электротехнологическом оборудовании системы электроснабжения электросталеплавильных комплексов / В.В. Зиновкин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2005. - №5/2(17). – С. 72-76.
4. Залужный М.Ю. Моделирование нестационарных электромагнитных процессов в системе электроснабжения энергоемких электротехнологических комплексов / М.Ю. Залужный // Электротехника и электроэнергетика. – 2009. - №2. - С. 70-73.
5. Зиновкин В.В. Моделирование потерь электрической энергии в системах с резкопеременными нагрузками при различных схемах соединения обмоток трансформаторного оборудования / В.В. Зиновкин, М.Ю. Залужный // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2010. – №28. – С. 487–488.

REFERENCES

1. Shidlovskij A. K., Kuznetcov V. G. Povyshenie kachestva energii v elektricheskix cepyax [Upgrading of energy in electric chains]. Kiev «Naukova Dumka», 1985. 268 p.
2. Zhezhelenko I. V., Saenko Iu. L. Kachestvo elektroenergii na promyshlennyx predpriyatiyax [Quality of electric power on industrial enterprises]. Moskva «Energoatomizdat», 2005. 261 p.
3. Zinovkin V. V. Multivariable analysis of totality of parameters of the non-variable loading and electromagnetic processes in the electro-technological equipment of the system of power supply of electro- steel-smelting complexes. Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyx tehnologij. 2005; №5/2(17): 72-76.
4. Zaluzhnyj M. Iu. Design of electromagnetic transients in the system of power supply of power-hungry electro-technological complexes. Elektrotexnika i elektroenergetika. 2009; №2: 70-73.
5. Zinovkin V. V., Zaluzhnyj M. Iu. Design of losses of electric energy in the systems with the non-variable loading at the different charts of connection of winding of transformer equipment. Vestneyk nacionalnogo texnicheskogo universiteta «XPI». 2010; №28: 487-488.

Надійшла до редакції 01.04.2013

Рецензент: О.П. Ковальов

М.Ю. ЗАЛУЖНИЙ

Запорізький національний технічний університет

Моделювання втрат в електротехнологічному комплексі при спільній роботі дугових сталеплавильних печей. Запропоновано комп'ютерну модель сталеплавильного комплексу, що дозволяє досліджувати впливи спільної роботи дугових сталеплавильних печей на електромагнітні процеси в електротехнічному обладнанні і системі електропостачання комплексу. Показано, що втрати електричної енергії збільшуються за нелінійним законом із зростанням несинусоїдності струму в обох сталеплавильних печах.

Ключові слова: моделювання, втрати електричної енергії, електротехнологічний комплекс, дугова сталеплавильна піч, нелінійність, несинусоїдальність струму.

M. ZALUZHNIY

Zaporizhzhya National Technical University

Design of Losses in Electro-Technological Complex During Joint Work of Arc Steel-Smelting Stoves. The current share of steel produced in electric arc furnaces in the volume of world steel output exceeds 30%. The increase is accompanied by increased melting furnace capacity, which reaches 200 tons. Power consumption is 100 - 200MVA. Work of arc steel-smelting stoves, with the unstable consumption of reactive-power, is accompanied by an origin in the electric network of vibrations of tension, and non-linearity and unsymmetry of the phase currents consumed by a stove result in non-sinusoidal current, unsymmetry voltage. The primary requirement is to reduce the energy losses at the optimum energy consumption and energy efficiency of electrical and electro technology equipment. Even a slight reduction of energy losses in a piece of equipment results in a significant increase in economic performance in the system. Therefore, the research questions of losses in the steel-making complex are of great interest. For researches of influence of joint work of arc steel-smelting stoves on electromagnetic processes the computer model of steel-smelting complex was offered in an electrical engineering equipment and system of electrical engineering complex. Arc gap is a nonlinear element, which is described by Cassie. Researches were conducted at withholding of non-sinusoidal in one stove permanent, and in the second changed it in the range of 0-78%. Dependences of change of losses were obtained on a high-voltage side at different connections of windings of network and electro-stove transformers. The analysis of the obtained results showed that the charts of connection did not influence the character of change of losses. The maximum difference between the increment of losses under various schemes of connection of the transformer windings will not exceed 9% to 60% of non-sinusoidal. These relationships have characteristic extremes shown in the figure. Maximum losses occur in both ovens. Before and after these peaks, there is a decrease of losses. This allowed the dependencies of approximate polynomial functions.

Key words: modeling, losses of electric energy, electro-technological complex, arc steel-smelting stove, non-linearity, non-sinusoidal current.