

УДК 621.365.2

МЕТОД РАСЧЕТА ТОКОВ ГРУППЫ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

© 2008 А. В. Салтыков

Самарский государственный технический университет

Разработан метод расчёта электрических и рабочих характеристик любого количества параллельных ДСП за счёт приведения сопротивлений печных контуров параллельных ДСП к шинам высокого напряжения и использования метода наложения. Показано, что для определения суммарного рабочего тока параллельных ДСП в СЭС могут быть использованы способ сложения последовательно-параллельных сопротивлений группы ДСП и способ сложения рабочих токов ДСП по теореме “косинусов”. Выявлено, что определение суммарного рабочего тока параллельных ДСП простым сложением рабочих токов приводит к несущественным погрешностям.

Параллельные дуговые сталеплавильные печи, метод расчёта токов, сопротивление печного контура

Электроснабжение группы параллельных дуговых сталеплавильных печей (ДСП) имеет ряд принципиальных особенностей, обусловленных, в первую очередь, взаимным влиянием переменных режимов работы ДСП друг на друга и сложным, как правило, случайным характером воздействия мощной резкопеременной нагрузки ДСП на систему электроснабжения (СЭС), ограничиваемой нагрузкой силового электрооборудования, показателями качества электроэнергии и в целом электромагнитной совместимостью с СЭС [1].

Особенностью режимов ДСП является их возможность работы на различных ступенях печного трансформатора, т.е. с различными коэффициентами трансформации, а также разнообразие значений уставок тока дуги ДСП, задаваемых при неизменном коэффициенте трансформации печного трансформатора.

Однако недостаток, связанный с различием коэффициентов трансформации печных трансформаторов (ПТ), а, следовательно, и их сопротивлений, может быть устранён приведением сопротивлений печных контуров, параллельных ДСП, к шинам высшего напряжения, т.е. к шинам общего напряжения их питания от СЭС $U_{шсх}$, по выражениям (для двух параллельных ДСП):
для ДСП № 1:

$$\underline{Z}_{1K,1} = R_{K1} \cdot K_{ПТ1}^2 + jX_{K1} \cdot K_{ПТ1}^2; \quad (1)$$

для ДСП № 2:

$$\underline{Z}_{1K,2} = R_{K2} \cdot K_{ПТ2}^2 + jX_{K2} \cdot K_{ПТ2}^2; \quad (2)$$

где R_{K1} , R_{K2} – активные сопротивления печного контура на стороне низкого напряжения ДСП № 1 и № 2; X_{K1} , X_{K2} – индуктивные сопротивления печного контура на стороне низкого напряжения ДСП № 1 и № 2;

$\underline{Z}_{1K,1}$, $\underline{Z}_{1K,2}$ – полные комплексные сопротивления печного контура на стороне высокого напряжения ДСП № 1 и № 2; $K_{ПТ1}$, $K_{ПТ2}$ – коэффициенты трансформации печных трансформаторов ДСП № 1 и № 2.

Для параллельных цепей печных контуров определяется полное комплексное суммарное сопротивление для режимов эксплуатационного короткого замыкания (ЭКЗ) в общей точке подключения ДСП № 1 и № 2 по выражениям

$$\underline{Z}_{1K,\Sigma} = R_{1K,\Sigma} + jX_{1K,\Sigma}, \quad (3)$$

где $\underline{Z}_{1K,\Sigma}$ – полное комплексное суммарное сопротивление параллельных печных контуров ДСП № 1 и № 2 при ЭКЗ; $R_{1K,\Sigma}$ – активное суммарное сопротивление параллельных

печных контуров ДСП № 1 и № 2 при ЭКЗ; $X_{1K,\Sigma}$ – суммарное индуктивное сопротивление параллельных печных контуров ДСП № 1 и № 2 при ЭКЗ.

По параметрам суммарных сопротивлений печных контуров ДСП №1 и №2 находится общий ток эксплуатационного короткого замыкания (ЭКЗ) группы ДСП на стороне высокого напряжения по выражению

$$I_{1K,S} = \sqrt{\left(\frac{Z_{1K,S} \cdot S_{K3}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot b \cdot X_{1K,S} \cdot U_{ИСХ}} \right)^2 + \frac{S_{K3}}{3 \cdot b \cdot X_{1K,S}} - \frac{Z_{1K,S} \cdot S_{K3}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot b \cdot X_{1K,S} \cdot U_{ИСХ}}}, \quad (4)$$

где b – коэффициент потерь мощности в СЭС; $Z_{1K,\Sigma}, X_{1K,\Sigma}$ – суммарные полное (по модулю) и индуктивное сопротивления параллельных печных контуров ДСП №1 и №2; $U_{ИСХ}$ – исходное напряжение на стороне высокого напряжения питания параллельных ДСП №1 и №2; S_{K3} – мощность короткого замыкания на шинах питания параллельных ДСП №1 и №2.

Напряжение на стороне высокого напряжения питания параллельных ДСП №1 и №2 для режима ЭКЗ определяется по выражению

$$U_{1K,\Sigma} = \sqrt{3} \cdot I_{1K,\Sigma} \cdot Z_{1K,\Sigma}, \quad (5)$$

а токи эксплуатационного короткого замыкания (ЭКЗ) для каждой из параллельных ДСП – по выражениям

$$а) \text{ для ДСП № 1: } I_{1K,1} = \frac{U_{1K,\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot Z_{1K,1}}, \quad (6)$$

$$б) \text{ для ДСП №2: } I_{1K,2} = \frac{U_{1K,\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot Z_{1K,2}}. \quad (7)$$

С учётом принятых относительных значений m_1 и m_2 определяются рабочие токи для каждой из параллельных ДСП по выражениям

$$а) \text{ для ДСП № 1: } I_{1раб,1} = m_1 \cdot I_{1K,1}, \quad (8)$$

$$б) \text{ для ДСП №2: } I_{1раб,2} = m_2 \cdot I_{1K,2}, \quad (9)$$

где m_1 – коэффициент пропорциональности принятого рабочего тока $I_{1раб,1}$ для ДСП № 1 к собственному току ЭКЗ $I_{1K,1}$; m_2 – коэффициент пропорциональности принятого рабочего тока $I_{1раб,2}$ для ДСП № 2 к собственному току ЭКЗ $I_{1K,2}$.

Затем определяются индуктивные сопротивления, соответствующие собственным рабочим токам, для каждой из параллельных ДСП № 1 и №2 – $X_{1раб,1}, X_{1раб,2}$ по выражениям

$$X_{1раб,1} = X_{1K,1} \sqrt[3]{\frac{1}{m_1}}, \quad (10)$$

$$X_{1раб,2} = X_{1K,2} \sqrt[3]{\frac{1}{m_2}}. \quad (11)$$

По вычисленным значениям $I_{1раб,1}, I_{1раб,2}, X_{1раб,1}, X_{1раб,2}$ может быть определено значение рабочего напряжения на шинах питания группы параллельных ДСП по выражению

$$U_{1раб} = \frac{U_{ИСХ} [S_{K3} - 3 \cdot b (I_{1раб,1}^2 \cdot X_{1раб,1} + I_{1раб,2}^2 \cdot X_{1раб,2})]}{S_{K3}}. \quad (12)$$

По значениям $I_{1раб,1}, I_{1раб,2}, X_{1раб,1}, X_{1раб,2}$ могут быть также определены реактивные мощности $Q_{1раб,1}$ и $Q_{1раб,2}$, соответствующие собственным рабочим токам, для каждой из параллельных ДСП № 1 и №2 по выражениям

$$Q_{1раб,1} = 3 \cdot I_{1раб,1}^2 \cdot X_{1раб,1}, \quad (13)$$

$$Q_{1раб,2} = 3 \cdot I_{1раб,2}^2 \cdot X_{1раб,2}. \quad (14)$$

При этом рабочее напряжения на шинах питания ДСП, определяемое нагрузкой в рабочем режиме параллельных ДСП №1 и ДСП №2, рассчитывается по выражению

$$U_{1раб} = \frac{U_{ИСХ} [S_{K3} - b(Q_{1раб,1} + Q_{1раб,2})]}{S_{K3}}. \quad (15)$$

На основании выражений (12) или (15) определяются полные сопротивления, соответствующие собственным рабочим токам, для каждой из параллельных ДСП № 1 и №2 по выражениям

$$\text{для ДСП № 1: } Z_{1раб,1} = \frac{U_{1раб}}{\sqrt{3} \cdot I_{1раб,1}}, \quad (16)$$

$$\text{для ДСП № 2: } Z_{1раб,2} = \frac{U_{1раб}}{\sqrt{3} \cdot I_{1раб,2}}, \quad (17)$$

а активные сопротивления, соответствующие собственным рабочим токам, для каждой из параллельных ДСП № 1 и №2 - по выражениям

$$\text{для ДСП № 1: } R_{1раб,1} = \sqrt{Z_{1раб,1}^2 - X_{1раб,1}^2}, \quad (18)$$

$$\text{для ДСП № 2: } R_{1раб,2} = \sqrt{Z_{1раб,2}^2 - X_{1раб,2}^2}. \quad (19)$$

Для определения суммарного рабочего тока в СЭС (в обмотке силового трансформатора ГПП) могут быть использованы два способа:

а) способ сложения последовательно-параллельных сопротивлений ДСП №1 и ДСП №2

$$Z_{1раб\Sigma} = Z_{1раб1} // Z_{1раб2}; \quad (20)$$

с выполнением вычислений по выражениям, аналогичным (1) – (3), и по выражению

$$I_{1раб\Sigma} = \frac{U_{1раб}}{\sqrt{3} \cdot Z_{1раб\Sigma}}; \quad (21)$$

б) способ сложения рабочих токов ДСП №1 – $I_{1раб,1}$ и ДСП №2 – $I_{1раб,2}$ по теореме “косинусов” [2].

Для применения теоремы “косинусов” необходимо определение фазовых углов между рабочим током соответствующей ДСП и рабочим напряжением на шинах питания группы ДСП.

Для решения этой задачи вычисляются падения напряжения U_{1R}, U_{1X} на активных и индуктивных сопротивлениях печного контура параллельных дуговых сталеплавильных печей:

для рабочего режима ДСП №1:

$$U_{1R,раб,1} = \sqrt{3} \cdot I_{1,раб,1} \cdot R_{1раб,1}, \quad (22)$$

$$U_{1X,раб,1} = \sqrt{3} \cdot I_{1,раб,1} \cdot X_{1раб,1}, \quad (23)$$

для рабочего режима ДСП №2:

$$U_{1R,раб,2} = \sqrt{3} \cdot I_{1,раб,2} \cdot R_{1раб,2}, \quad (24)$$

$$U_{1X,раб,2} = \sqrt{3} \cdot I_{1,раб,2} \cdot X_{1раб,2}, \quad (25)$$

а затем определяются фазовые сдвиги рабочих токов ДСП по выражениям для ДСП №1:

$$f_{раб,1}^0 = \arctg \frac{U_{1X,раб,1}}{U_{1R,раб,1}}, \quad (26)$$

для ДСП №2:

$$f_{раб,2}^0 = \arctg \frac{U_{1X,раб,2}}{U_{1R,раб,2}}. \quad (27)$$

Найденные по приведённым формулам фазовые углы позволяют вычислить суммарный ток от группы параллельных ДСП по выражению

$$I_{1раб\Sigma} = \sqrt{I_{1раб,1}^2 + I_{1раб,2}^2 - 2 \cdot I_{1раб,1} \cdot I_{1раб,2} \cdot \cos[180^\circ - (f_1^0 - f_2^0)]} \quad (28)$$

и построить векторные диаграммы токов и падений напряжения для рабочих режимов ДСП на любых ступенях печных трансформаторов (ПТ) и для соответствующих значений относительных рабочих токов m_1 и m_2 .

Вычисленные значения падений напряжения и рабочие токи ДСП-40 №1 и ДСП-40 №2 для ряда значений m и ряда ступеней ПТ при их параллельном подключении сведены в таблицу 1, а изменения суммарных значений токов параллельных ДСП на общих шинах их питания показаны в таблице 2.

Таблица 1. Падения напряжений и рабочие токи ДСП-40 №1 и ДСП-40 №2 для ряда значений m и ряда ступеней ПТ при их параллельном подключении

ДСП-40 №1						ДСП-40 №2					
Ступень	m_1	$U_{1R,раб,1}$ кВ	$U_{1X,раб,1}$ кВ	$I_{1раб,1}$ кА	$f_{раб,1}$ град	ступень	m_2	$U_{1R,раб,2}$ кВ	$U_{1X,раб,2}$ кВ	$I_{1раб,2}$ кА	$f_{раб,2}$ град
1	0,63	7,325	6,297	0,917	40,69	1	0,63	7,325	6,297	0,917	40,69
1	0,63	7,573	6,297	0,917	39,75	1	0,44	8,51	4,957	0,641	30,22
1	0,63	7,324	6,385	0,927	40,99	2	0,63	7,332	6,355	0,796	40,92
1	0,63	7,542	6,365	0,927	40,16	2	0,44	8,506	5,003	0,556	30,46
1	0,63	7,322	6,422	0,935	41,25	3	0,63	7,337	6,405	0,694	41,12
1	0,63	7,515	6,422	0,935	40,52	3	0,44	8,503	5,042	0,485	30,67
1	0,63	7,319	6,513	0,949	41,66	5	0,63	7,355	6,472	0,538	41,34
1	0,63	7,471	6,513	0,949	41,08	5	0,44	8,502	5,095	0,376	30,93
1	0,63	7,317	6,568	0,957	41,91	7	0,63	7,397	6,478	0,446	41,21
1	0,63	7,444	6,568	0,957	41,42	7	0,44	8,518	5,099	0,311	30,91

Таблица 2. Изменение значений суммарных токов параллельных ДСП-40

Ступень ДСП №1	Ступень ДСП №2	$\Delta j_{раб} = j_{раб,1} - j_{раб,2}$	$U_{1раб}$	$I_{1,раб\Sigma}$	$I_{1,раб\Sigma} = I_{1раб,1} + I_{1раб,2}$
1	1	0	9,66	1,835	1,835
1	1	9,53	9,849	1,553	1,558
1	2	0,07	9,703	1,723	1,723
1	2	9,7	9,868	1,478	1,483
1	3	0,13	9,739	1,630	1,63
1	3	9,85	9,885	1,416	1,42
1	5	0,32	9,797	1,487	1,487
1	5	10,15	9,911	1,320	1,325
1	7	0,7	9,833	1,402	1,403
1	7	10,51	9,927	1,264	1,268

Векторные диаграммы общего рабочего напряжения на шинах питания ДСП $U_{1раб}$, суммарного тока $I_{1раб,\Sigma}$, токов и падений напряжения для двух параллельных ДСП-40 представлены на рис. 1...4.

Для построения векторных диаграмм были выбраны значения рабочих токов ДСП-40: при $m = 0,63$, характеризующих режим максимальной производительности ДСП, и при $m = 0,44$, характеризующих режим минимального удельного расхода электроэнергии ДСП, т.е. значения m , отражающие границы рациональных рабочих режимов ДСП-40.

Практический интерес, как показано в табл. 1, представляет то обстоятельство, что при разных величинах рассмотренных относительных значений токов m параллельных ДСП и при их работе на разных ступенях трансформации печного трансформатора угловой сдвиг между рабочими токами ДСП-40, составляющий $\Delta j_{раб} = j_{раб,1} - j_{раб,2} = 0...10,5^0$, не приводит к существенным погрешностям при определении суммарного тока группы ДСП простым сложением рабочих токов параллельных ДСП:

$$I_{1раб\Sigma} \cong I_{1раб,1} + I_{1раб,2} \quad (29)$$

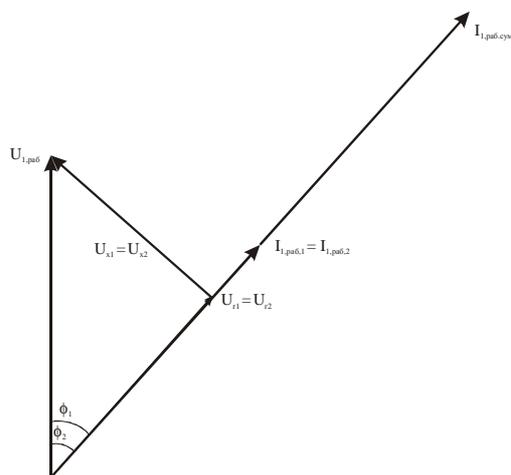


Рис. 1. Векторная диаграмма суммарного тока $I_{1,раб,S}$, токов, падений напряжения: для ДСП №1 (ступень 1, $m_1 = 0,63$) и ДСП №2 (ступень 1, $m_1 = 0,63$)

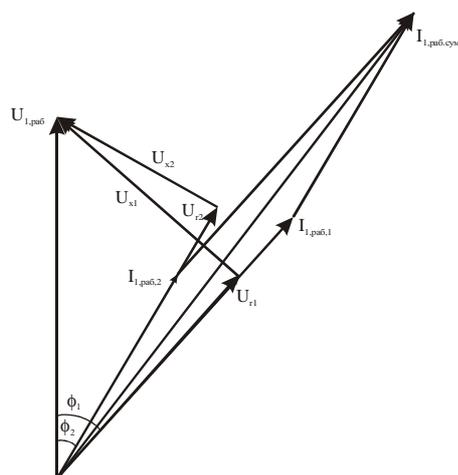


Рис. 2. Векторная диаграмма суммарного тока $I_{1,раб,S}$, токов, падений напряжения: для ДСП №1 (ступень 1, $m_1 = 0,63$) и ДСП №2 (ступень 1, $m_1 = 0,44$)

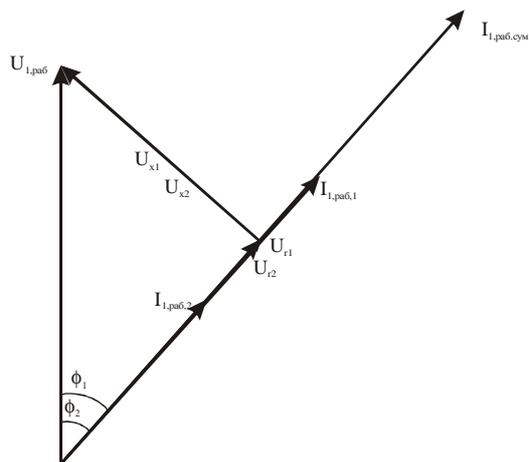


Рис 3. Векторная диаграмма суммарного тока $I_{1,раб,S}$, токов, падений напряжения: для ДСП №1 (ступень 1, $m_1 = 0,63$) и ДСП №2 (ступень 5, $m_1 = 0,63$)

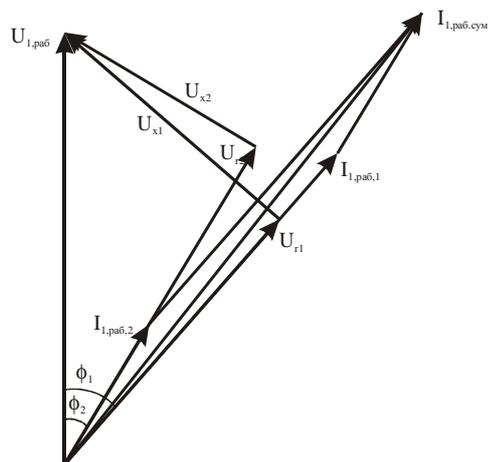


Рис 4. Векторная диаграмма суммарного тока $I_{1,раб,S}$, токов, падений напряжения: для ДСП №1 (ступень 1, $m_1 = 0,63$) и ДСП №2 (ступень 5, $m_1 = 0,44$)

Подобное упрощение при определении суммарного тока от группы параллельных ДСП приводит к незначительной погрешности, которая не превышает 0,4 %.

Дальнейшие расчеты при подключении дополнительных параллельных ДСП выполняются методом наложения, т.е. когда предыдущие параллельные ДСП представляются эквивалентными (суммарными) сопротивле-

ниями и т.д.

Разработанный метод позволяет определять электрические и рабочие характеристики любого количества параллельных ДСП, работающих как на одинаковых, так и различных ступенях печных трансформаторов [3]. Одновременно могут быть определены уровни и отклонения напряжения на общих шинах питания параллельных ДСП.

Библиографический список

1. Салтыков, В. М. Влияние характеристик дуговых сталеплавильных печей на качество напряжения в системах электроснабжения / В. М. Салтыков, О. А. Салтыкова, А. В. Салтыков. – М.: Энергоатомиздат, 2006.
2. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев – М.: Наука, 1965.
3. Салтыков, А. В. Рациональные режимы параллельных дуговых сталеплавильных печей и их электромагнитная совместимость с системой электроснабжения / А. В. Салтыков – М.: Энергоатомиздат, 2007.

References

1. V.M. Saltykov, O.A. Saltykova, A.V. Saltykov. Influence of electric arc steel melting furnace characteristics on the quality of voltage in power supply system / Moscow: Energoatomizdat, 2006.
2. I. N. Bronshtein, K. A. Semendyaev. Mathematics reference book for engineers and students of technical universities / Moscow: Nauka (Science), 1965.
3. A. V. Saltykov. Rational conditions of parallel electric arc steel melting furnaces and their electromagnetic compatibility with an electric power supply system. – Moscow: Energoatomizdat, 2007.

**METHOD OF CALCULATING CURRENTS OF A GROUP
OF PARALLEL ELECTRIC ARC STEEL MELTING FURNACES**

© 2008 A. V. Saltykov

Samara State Technical University

The paper presents a method of calculating electrical and operating characteristics of any number of parallel EASMFs due to the reduction of furnace circuit resistances to high-voltage buses and the use of the method of superposition. It is shown that in order to determine the combined operating current of parallel EASMFs at the method of adding series-parallel resistances of a group of EASMFs and the method of EASSF operating currents according to the cosine law can be used. It has been found that determining the combined operating current of parallel EASMFs by simple adding of operating currents leads to insignificant errors.

Parallel electric arc steel smelting furnaces, method of calculating currents, furnace circuit resistance

Информация об авторе

Салтыков Александр Валентинович. Самарский государственный технический университет. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

Saltykov, Alexander Victorovitch. Samara State Technical University. Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Automated Electrical Power Engineering Systems.