

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 $U_{исх}$, 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

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

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; $U_{ИСК}$ – 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

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

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

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

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

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

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

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

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 напряжение на шинах питания ДСП, определяемое нагрузкой в рабочем режиме параллельных ДСП №1 и ДСП №2, рассчитывается по выражению

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

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

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

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 $\Delta j_{раб} = j_{раб,1} - j_{раб,2} = 0 \dots 10,5^\circ$, не приводит к существенным погрешностям при определении суммарного тока группы ДСП простым сложением рабочих токов параллельных ДСП:

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

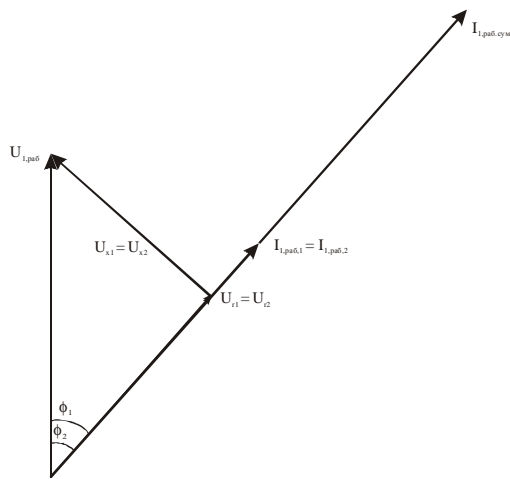


Рис. 1. Векторная диаграмма суммарного тока

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

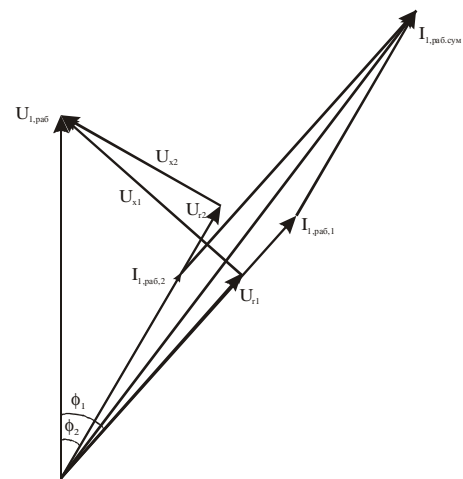


Рис. 2. Векторная диаграмма суммарного тока

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

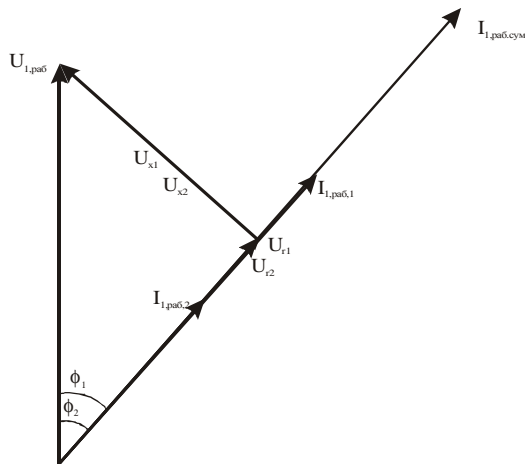


Рис 3. Векторная диаграмма суммарного тока

$I_{1,раб,S}$, токов, падений напряжения:
для ДСП №1 (ступень 1, $m_1 = 0,63$)
и ДСП №2 (ступень 5, $m_1 = 0,63$)

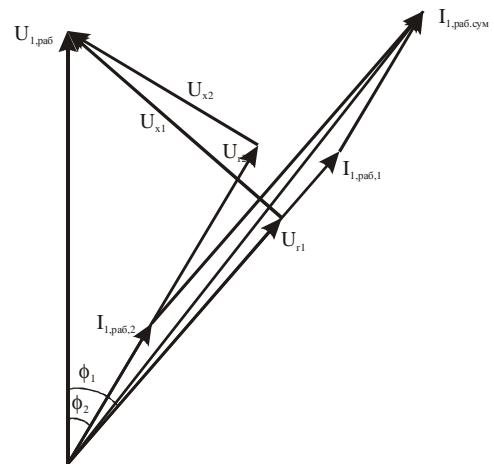


Рис 4. Векторная диаграмма суммарного тока

$I_{1,раб,S}$, 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.

Информация об авторе

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