

РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ТИРИСТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ПЛАВКИ ДСП

Канд. техн. наук В.С. Чуприков, ВЭИ

При работе мощных ДСП, питающихся от относительно слабых энергосистем, на шинах нагрузки имеют место существенные посадки напряжения, которые обратно пропорциональны мощности КЗ на них. При этом снижается уровень активной мощности, вводимой в печь, особенно в режиме расплавления, увеличивается продолжительность цикла плавки и уменьшается производительность печи в целом. В [1] производительность печи в первом приближении принималась пропорциональной квадрату питающего напряжения. Для анализа влияния на производительность печи параметров системы электроснабжения и самой печи, а также для оценки повышения производительности за счет установки на шины нагрузки тиристорного компенсатора реактивной мощности (ТКРМ) при прочих равных условиях, т.е. при неизменном напряжении энергосистемы и неизменных отпайках регулятора напряжения под нагрузкой (РПН) сетевого и печного трансформаторов, рассмотрим рис. 1.

Все напряжения и сопротивления приведены к номинальному напряжению шин нагрузки.

Исходные уравнения для расчета (в отсутствие ТКРМ):

$$I_n = e_c / \sqrt{x_{\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2}; \quad (1)$$

$$I_a = e_c r_{\Sigma} / (x_{\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2); \quad (2)$$

$$I_p = e_c x_{\Sigma} / (x_{\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2), \quad (3)$$

где $x_{\Sigma} = x_{к.с} + x_{л} + x_{т} + x_{п.т} + x_{кор.сет}$;

$$r_{\Sigma} = r_c + r_{л} + r_{т} + r_{п.т} + r_{кор.сет} + r_{д}$$

I_a и I_p — соответственно активная и реактивная составляющая тока печи I_n .

Из (1) — (3) легко получить выражение, описывающее векторную диаграмму тока печи, приведенную на рис. 2,

$$I_a^2 + I_p^2 = I_n^2 e_c^2 / x_{\Sigma}^2. \quad (4)$$

При изменении сопротивления дуги от бесконечности до нуля ток печи изменяется от нуля до тока эксплуатационного КЗ

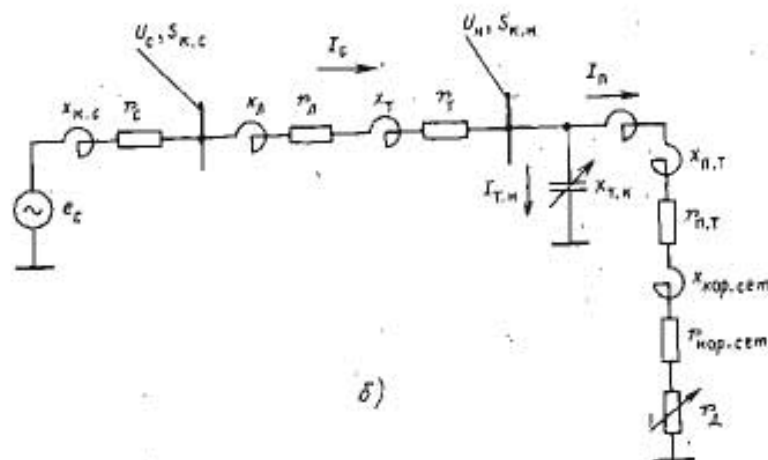
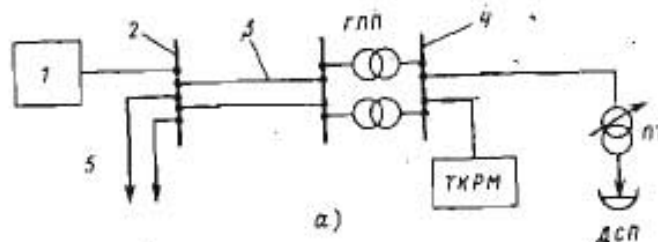


Рис. 1. Система электроснабжения ДСП (а) и однолинейная схема замещения (б):

1 — энергосистема; 2 — шины районной подстанции 110–330 кВ; 3 — линия электропередачи; 4 — шины нагрузки 35 кВ; 5 — выводы к местным нагрузкам; ПТ — печной трансформатор; e_c — ЭДС холостого хода энергосистемы; $x_{к.с}$ и r_c — сопротивление КЗ энергосистемы и ее активное сопротивление; U_c и $S_{к.с}$, U_n и $S_{ж.к}$ — напряжение и мощность КЗ энергосистемы на шинах районной подстанции и шинах нагрузки соответственно; $x_{л}$ и $r_{л}$, $x_{т}$ и $r_{т}$ — реактивное и активное сопротивление линии электропередачи и сетевых трансформаторов соответственно; I_c — ток энергосистемы; $I_{Т.к}$ и $\alpha_{Т.к}$ — ток и реактивное сопротивление ТКРМ; $I_{п.т}$ — ток печи; $x_{п.т}$ и $r_{п.т}$, $x_{кор.сет}$ и $r_{кор.сет}$ — реактивное и активное сопротивление печного трансформатора и короткой сети соответственно; $r_{д}$ — сопротивление дуги

$$I_{3,кз} = e_c / \sqrt{x_{\Sigma}^2 + (r_c + r_{л} + r_{т} + r_{п.т} + r_{кор.сет})^2}$$

Обозначим

$$x_{к.н} = x_{к.с} + x_{л} + x_{т}; x_{п} = x_{п.т} + x_{кор.сет}$$

Диаметр полуокружности, по которой перемещается конец вектора тока печи (см. рис. 2), равен некоторому условному току

$$I_{к1} = e_c / (x_{к.н} + x_n).$$

При наличии ТКРМ, полностью компенсирующего реактивную мощность нагрузки (рассматривается квазистационарный режим горения дуги), т.е. при $I_{т.к} = -I_p$, реактивная составляющая тока системы I_c равна нулю, а падение напряжения на реактивных элементах $x_{к.с}$, x_n и x_t отсутствует. Фактически ТКРМ шунтирует эти реактивные сопротивления и, если пренебречь потерями в активных сопротивлениях r_c , r_n и r_t , а также зависимостью реактивной мощности линии электропередачи от протекающей по ней активной мощности, переносит ЭДС энергосистемы e_c на шины нагрузки. В этом случае диаметр полуокружности вектора тока печи

$$I_{к2} = e_c / x_n > I_{к1}.$$

Номинальной нагрузке печного трансформатора в режиме расплавления соответствует номинальное паспортное значение полного тока $I_{ном}$. При наличии ТКРМ, поддерживающего номинальное значение напряжения на шинах нагрузки, этому значению полного тока соответствует значение его активной составляющей $I_{а.ном2}$, определяемое параметрами печного трансформатора и короткой сети. В отсутствие ТКРМ напряжение на шинах нагрузки уменьшается, и для обеспечения того же номинального значения полного тока печи надо перейти на плавку с более короткими дугами. Этому режиму соответствует значение активного тока $I_{а.ном1}$, меньше $I_{а.ном2}$ и зависящее также и от параметров системы электроснабжения.

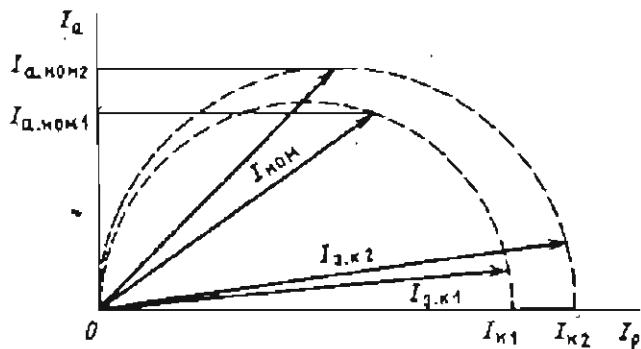


Рис. 2. Векторная диаграмма тока ДСП:
 $I_{ном}$ — номинальный ток печи; $I_{а.ном1}$, $I_{а.ном2}$ — активная составляющая тока печи в отсутствии и при наличии ТКРМ соответственно; $I_{з.к1}$, $I_{з.к2}$ — токи эксплуатационного КЗ; $I_{к1}$, $I_{к2}$ — условные токи КЗ

Определим эти значения активного тока. Из выражения (4)

$$I_p = I_n^2 x_{\Sigma} / e_c = I_n^2 / I_{к1}. \quad (5)$$

Тогда

$$I_a = \sqrt{I_n^2 - I_p^2} = I_n \sqrt{1 - (I_n / I_{к1})^2}$$

и

$$\frac{I_{а.ном2}}{I_{а.ном1}} = \frac{I_{к1}}{I_{к2}} \sqrt{\frac{I_{к2}^2 - I_{ном}^2}{I_{к1}^2 - I_{ном}^2}}$$

Зависимость напряжения на шинах нагрузки от тока ДСП в отсутствие ТКРМ определяется следующим выражением:

$$U_n = e_c - I_p x_{к.н}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) выражение (5) и обозначая

$$I_{к.н} = e_c / x_{к.н},$$

получаем

$$U_n = e_c [1 - I_n^2 / (I_{к.н} I_{к1})].$$

Тогда активная мощность, вводимая в печь (пренебрегая активными потерями в печном трансформаторе и короткой сети) будет равна

$$P_1(I_n) = 3e_c I_n [1 - I_n^2 / (I_{к.н} I_{к1})] \sqrt{1 - (I_n / I_{к1})^2}.$$

Переходя к относительным единицам и введя обозначение

$$a_1 = I_n / I_{к1},$$

получаем

$$P_1(a_1) = 3e_c I_{к1} a_1 \sqrt{1 - a_1^2} (1 - a_1^2 I_{к1} / I_{к.н}).$$

При наличии ТКРМ $U_n = e_c$ и

$$P_2(a_2) = 3e_c I_{к2} a_2 \sqrt{1 - a_2^2},$$

где $a_2 = I_n / I_{к2}$.

Увеличение активной мощности печи за счет ТКРМ при номинальном токе печи составляет

$$\frac{P_2(I_{ном})}{P_1(I_{ном})} = \frac{1}{1 - I_{ном}^2 / (I_{к.н} I_{к1})} \frac{I_{к1}}{I_{к2}} \sqrt{\frac{I_{к2}^2 - I_{ном}^2}{I_{к1}^2 - I_{ном}^2}}. \quad (7)$$

Определим активную мощность, вводимую в печь ДСП-100 ИБ с

печным трансформатором мощностью 80 МВ·А при номинальном напряжении 35 кВ и работе на третьей ступени напряжения в стадии расплавления, на примере Молдавского металлургического завода (ММЗ).

Исходные данные для расчета:

фазное напряжение на шинах нагрузки $U_c = 35/\sqrt{3} = 20,2$ кВ;

сопротивление КЗ на шинах 35 кВ $x_{к.н} = 2$ Ом (при $S_{к.н} = 613$ МВ·А);

суммарное реактивное сопротивление печного трансформатора и короткой сети на третьей ступени напряжения (при напряжении 686 В равно 3,8 мОм)

$$x_n = 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot 35^2 / 0,686^2 = 9,9 \text{ Ом};$$

номинальный ток обмотки высшего напряжения (ВН) печного трансформатора на третьей ступени напряжения

$$I_{ном} = 80 / (3 \cdot 20,2) = 1,32 \text{ кА}.$$

Определим токи КЗ

$$I_{к1} = 20,2 / (2 + 9,9) = 1,7 \text{ кА};$$

$$I_{к2} = 20,2 / 9,9 = 2,04 \text{ кА}; \quad I_{к.н} = 20,2 / 2 = 10,1 \text{ кА}.$$

В результате получаем

$$\left. \begin{aligned} I_{a1}(a_1) &= 1,7 a_1 \sqrt{1 - a_1^2}; \quad a_1 = I_n / 1,7; \\ I_{a2}(a_2) &= 2,04 a_2 \sqrt{1 - a_2^2}; \quad a_2 = I_n / 2,04; \end{aligned} \right\} \text{ (рис. 3)}$$

$$\left. \begin{aligned} U_n(a_1) &= 35(1 - 0,17a_1^2); \\ P_1(a_1) &= 103 a_1 \sqrt{1 - a_1^2} (1 - 0,17a_1^2); \\ P_2 &= 123,6 a_2 \sqrt{1 - a_2^2}. \end{aligned} \right\} \text{ (рис. 4)}$$

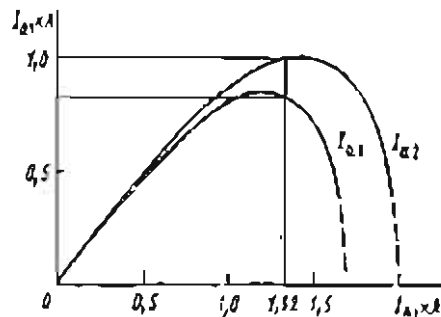


Рис. 3. Кривые зависимости активной составляющей тока ДСП от его полного значения

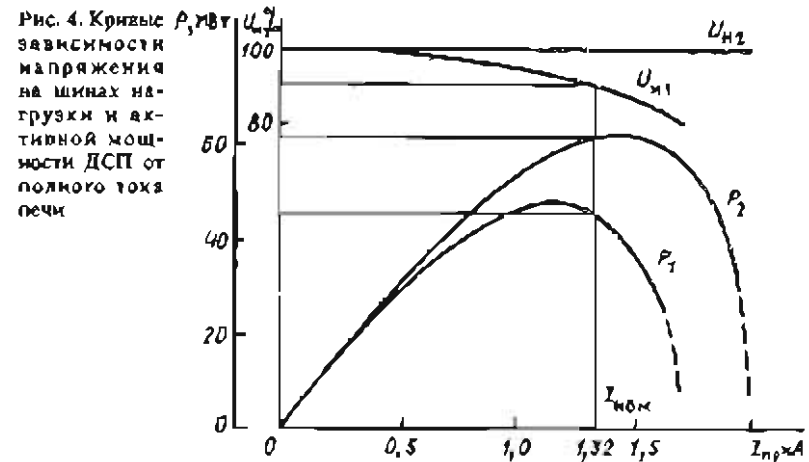


Рис. 4. Кривые зависимости напряжения на шинах нагрузки и активной мощности ДСП от полного тока печи

Стабилизация напряжения за счет установки ТКРМ позволяет увеличить в стадии расплавления активный ток печи на 21%, а активную мощность - на 33%. При длительности периода расплавления в системе без ТКРМ 80 мин, выигрыш во времени составляет 20 мин или 13% длительности всей плавки. По данным эксплуатации ММЗ работа компенсатора обеспечила сокращение периода расплавления на 15 - 20 мин, что хорошо согласуется с расчетами.

Приведенные выше соотношения характеризуют работу одной печи. Реально в большинстве сталеплавильных цехов установлены две печи и более. При работе в режиме "плавка на плавку" - наиболее экономичном с точки зрения использования машины непрерывного литья заготовок, а также при использовании внепечной доводки стали происходит наложение периодов расплавления двух печей в течение 30 - 40 мин на каждой плавке. При этом посадка напряжения на шинах 35 кВ увеличивается, и производительность печей уменьшается еще больше. При работе ТКРМ, мощность которого рассчитана на компенсацию реактивной мощности двух печей в режиме расплавления, напряжение на шинах нагрузки поддерживается на номинальном уровне. Выражение (7) для одновременной работы двух ДСП будет иметь вид:

$$\frac{P_2(I_{ном})}{P_1(I_{ном})} = \frac{1}{1 - 2 I_{ном}^2 / (I_{к.н} I_{к1})} \frac{I_{к1}}{I_{к2}} \sqrt{\frac{I_{к2}^2 - I_{ном}^2}{I_{к1}^2 - I_{ном}^2}}$$

В таблице приведены расчетные значения токов КЗ, посадки напряжения δU_n на шинах нагрузки и отношение P_2/P_1 (рис. 5) для печи типа ДСП-100 ИБ в зависимости от мощности КЗ на шинах 35 кВ при

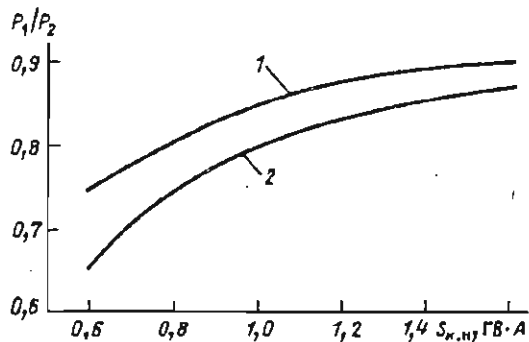


Рис. 5. Кривые зависимости относительной производительности одной (1) и двух (2) ДСП в режиме расплавления от мощности КЗ на шинах нагрузки

работе одной и двух ДСП на третьей ступени напряжения.

Очевидно, что при технико-экономическом обосновании применения ТКРМ на предприятиях с ДСП, помимо обеспечения им требуемых параметров качества электроэнергии необходимо учитывать и сокращение времени расплавления. По данным фирмы ASEA (Швеция) срок окупаемости ТКРМ для предприятий с ДСП составляет 1 — 3 года, причем в отдельных случаях установка ТКРМ обеспечивала увеличение объема годовой продукции предприятия более, чем на 20% [2].

| | | | | | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $S_{к.н.}$ | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |
| МВ·А | | | | | | | | |
| $x_{к.н.}$ | 2,04 | 1,75 | 1,53 | 1,36 | 1,22 | 1,02 | 0,88 | 0,77 |
| Ом | | | | | | | | |
| $I_{к.н.}$, кА | 9,9 | 11,5 | 13,2 | 14,9 | 16,6 | 19,8 | 23,1 | 26,4 |
| $I_{к1}$, кА | 1,69 | 1,73 | 1,77 | 1,80 | 1,82 | 1,85 | 1,87 | 1,89 |
| $\delta U_{н.}$, % (1ДСП) | 10,4 | 8,8 | 7,4 | 6,5 | 5,8 | 4,8 | 4,0 | 3,5 |
| P_2/P_1 (1ДСП) | 1,33 | 1,29 | 1,23 | 1,20 | 1,18 | 1,14 | 1,12 | 1,11 |
| P_2/P_1 (2ДСП) | 1,51 | 1,43 | 1,33 | 1,29 | 1,26 | 1,20 | 1,17 | 1,15 |

Выводы

1. При мощности КЗ на шинах нагрузки в пределах 1000 — 600 МВ·А установка ТКРМ обеспечивает при прочих равных условиях сокращение периода расплавления для печи типа ДСП-100 Иб от 18 до 33%.

2. Результаты приведенных расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными на Молдавском металлургическом заводе.

3. Эффект сокращения длительности плавки необходимо учитывать при технико-экономическом обосновании применения ТКРМ и расчете экономического эффекта от его использования.

Список литературы

1. Рабинович В. Л., Захаров З.Р. Влияние уровня напряжения сети на показатели работы дуговых сталеплавильных печей // Повышение качества электроэнергии: Тезисы докладов IV Всесоюзного совещания по качеству электрической энергии. Киев, 1978.
2. Повышение мощности электропередачи при помощи статических систем реактивной мощности // Доклад на Шведском энергетическом симпозиуме в Москве, СССР, декабрь, 1983.

УДК 621.365:621.316.1:51

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ФИЛЬТР — РЕГУЛЯТОР НАПРЯЖЕНИЯ

Канд. техн. наук В. М. Сорокин, ЭНИИ

Широкое применение преобразовательной техники на промышленных предприятиях и в энергосистемах вызвало необходимость столь же широкого применения фильтров высших гармоник для устранения искажений токов и напряжений, создаваемых преобразователями. В большинстве случаев частотный спектр тока преобразователя определен его схемой и содержит канонические гармонические составляющие с частотами $\nu - 2m \pm 1$, где ν — порядок гармоники по отношению к частоте сети, $m = 3, 6, \dots$ целое число, равное фазности (пульсности) преобразователя. Для ограничения токов канонических гармоник применяют комплекты параллельно включенных цепочек фильтров, каждая из которых настроена на одну, редко на две высшие гармоники [1].

Резонансным цепочечным фильтрам присущ ряд недостатков:

если фильтр необходим только для ограничения гармоник и не нужен как источник реактивной мощности, то для уменьшения установленной мощности элементов фильтра — реактора и конденсаторной батареи, а также для снижения потерь энергии фильтр должен компоноваться из элементов высокой добротности;

изменение частоты сети или резонансной частоты фильтра из-за нестабильности его элементов приведет к увеличению уровня гармоник тока в сети. Для устранения повышенного выброса гармоник необходимо увеличить мощность фильтра или применить в нем регулируемые элементы [2];

в сети, содержащей фильтр, как правило, создаются условия для резонанса тока в ветвях, образуемых индуктивным сопротивлением сети и емкостным сопротивлением фильтра, на частоте, ниже резонансной частоты фильтра.