

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭКОНОМИЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВА ЭНЕРГОЕМКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Актуальная для страны модернизация сталеплавильного производства с установкой дуговых электросталеплавильных печей (ДСП) и установками «печь-ковш» (УПК) имеет ряд особенностей, без учета которых невозможно создание экономичных и надежных систем электроснабжения.

Для электросталеплавильного производства характерны большие единичные мощности электропечных агрегатов с низким коэффициентом мощности, значительные сосредоточенные нагрузки, негативное воздействие ДСП и УПК на питающие и распределительные сети, наличие значительных индуктивностей и емкостей в электрической сети (мощные электропечные трансформаторы, протяженные кабельные линии 35 и 110 кВ и т.д.), что приводит к частым и значительным внутренним перенапряжениям.

Подключение новых ДСП и УПК к существующим электрическим сетям предприятий, в которых, как правило, эксплуатируется физически изношенное электрооборудование с ослабленной изоляцией, приводит к необходимости глубокого ограничения внутренних перенапряжений.

На Рис.1 приведена проектируемая схема электроснабжения для реконструируемого сталеплавильного производства одного из металлургических заводов Украины.

Схема разработана с учетом указанных выше особенностей электросталеплавильного производства и с учетом действующей схемы электроснабжения завода. Схема разработана ОАО «Тяжпромэлектропроект» (г. Харьков) и ЗАО «Струм» (г. Харьков) в сотрудничестве с фирмой AREVA-NOKIAN CAPACITORS, которые накопили большой опыт не только в проектировании, но также и в проведении исследований и расчетов переходных процессов в сетях высоковольтного электроснабжения сталеплавильных комплексов на металлургических заводах Украины и России.

Основными потребителями рассматриваемого комплекса являются ДСП с электропечным трансформатором 120 МВА и УПК №2 с трансформатором 25 МВА.

В связи с тем, что электропечные трансформаторы имеют высшее напряжение 35 кВ, проектом предусматривается сооружение в непосредственной близости от реконструируемого цеха понижающей ПС глубокого ввода с вторичным напряжением 35 кВ. Предусматривается также РУ-6 кВ (на Рис. 1 не показано).

Учитывая значительные дополнительные электрические нагрузки реконструируемого сталеплавильного производства и достаточно протяженную трассу от ПС-220/110/35 кВ до ПС-110/35/6 кВ (~ 3,5 км), в проекте рассмотрено два варианта передачи электроэнергии на ПС-110/35/6 кВ – на напряжении 220 и 110 кВ. По результатам технико-экономического сравнения вариантов в качестве питающего напряжения принято напряжение 110 кВ.

Как отмечалось, ДСП оказывают негативное воздействие на питающую сеть, при этом по характеру генерируемых ДСП помех наиболее весомое воздействие на сеть проявляется в возникновении колебаний напряжения и высших гармонических составляющих тока и напряжения. В меньшей мере ДСП оказывает влияние на общее искажение синусоидальности кривой напряжения и его несимметрию.

При определении уровня помех, т.е. расчетных показателей качества электроэнергии (ПКЭ), в соответствии с ГОСТ 13109-97 при работе новой ДСП-150 на стороне 220, 110 и 35 кВ использовались результаты инструментального обследования существующей ДСП с подобными параметрами электропотребления и работающей в аналогичной сети.

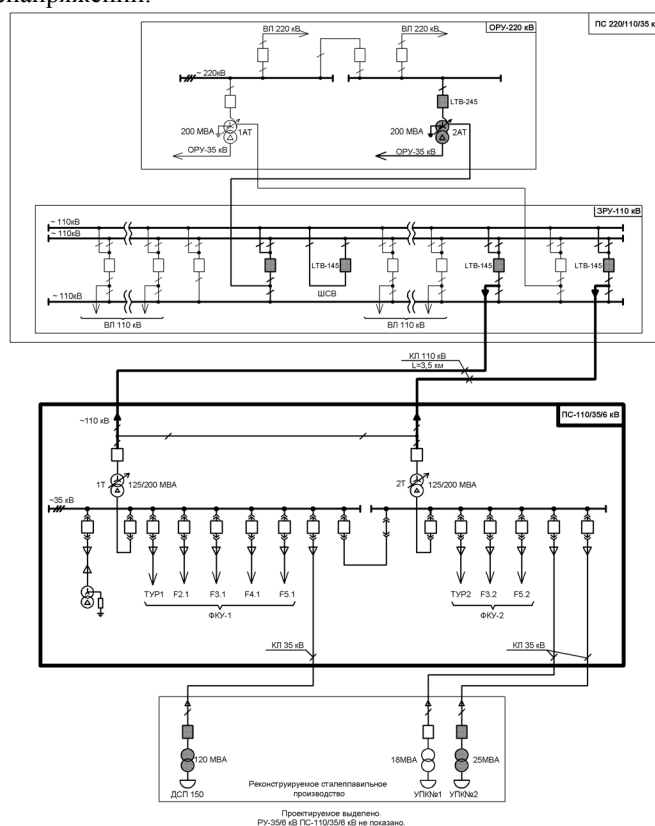


Рис. 1

Максимальные значения гармоник тока на напряжении 35 кВ и регистрограмма напряжения на шинах 35 кВ при работе ДСП показаны на Рис. 2 и Рис. 3.

С учетом параметров питающей сети (мощности короткого замыкания сети 220кВ, 110 кВ в максимальном и минимальном режимах), результатов обследования аналогичных печей, опыта по разработке мероприятий по снижению воздействий на питающую сеть, режимов работы и параметров новой печи ДСП-150 выполнены расчеты по определению ПКЭ на соответствие ГОСТ 13109-97.

В соответствии с расчетами значение коэффициентов 2...10 гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ превышают нормы ГОСТ 13109-97 на стороне 35 кВ.

Протекание в сети гармоник тока приводит к преждевременному износу изоляции электрооборудования сети и ее электроприемников – повреждению высоковольтных кабелей, преждевременному выходу из строя электродвигателей, усложнению режимов коммутации высоковольтных выключателей, значительным дополнительным потерям активной мощности.

Исследования показали, что токи утечки кабелей, работающих в условиях протекания в сети гармоник тока существенно больше, чем в аналогичных кабелях, работающих в условиях практически синусоидального напряжения.

Именно спектр гармоник напряжения ДСП наиболее существенно влияет на снижение электрической прочности изоляции кабелей, так как именно составляющие этих гармоник в соотношении

$$\Delta T = 1 - \left(1 + \frac{2}{\pi} \cdot k_{н.и.} \cdot k_{D_x} \cdot \sum_{n=2}^N K_{U(n)} \right) \cdot \left(1 - k_{D_x} \cdot \sum_{n=2}^N K_{U(n)} \right)$$

являются определяющими в снижении срока службы изоляции, где:

ΔT – сокращение срока службы изоляции;

$\sum_{n=2}^N K_{U(n)}$ – сумма коэффициентов кратности N высших гармоник напряжения;

$k_{н.и.}$ – коэффициент начальной ионизации;

k_{D_x} – коэффициент, учитывающий несовпадение максимумов высших гармоник напряжения.

Расчеты размахов изменения напряжения и дозы фликера на шинах 35 кВ ПС-110/35/6 кВ и шинах 110 кВ ПС-220/110/35 кВ показали, что эти показатели не соответствуют требованиям ГОСТ 13109-97 (в частности, кратковременная доза фликера, характеризующая уровень колебаний напряжения в сети 110 кВ ПС-220/110/35 кВ в 3 раза превышает допустимое значение, равное единице).

Расчеты ПКЭ показали, что для нормальной эксплуатации ДСП-150 необходимы специальные устройства с целью снижения негативного влияния печного агрегата на электрические сети.

В качестве таких устройств проектом предусмотрены два многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройства (ФКУ): ФКУ-1 – для ДСП-150; ФКУ-2 – для УПК №1 и №2.

В состав ФКУ-1 входят фильтры 2, 3, 4 и 5-ой гармоник и тиристорно-управляемый реактор (ТУР); в состав ФКУ-2 – фильтры 3-ей и 5-ой гармоник и также ТУР.

ФКУ обеспечивают подавление гармонических составляющих, колебаний напряжения и др., за счет чего обеспечиваются требования ГОСТ 13109-97 в части ПКЭ, а также компенсация реактивной мощности.

Срок окупаемости ФКУ около двух лет. Такой сравнительно небольшой срок окупаемости обеспечивается за счет повышения производительности ДСП и УПК, снижения времени цикла плавки, сокращения общих потерь активной мощности, снижения расходов по оплате за электроэнергию, снижения расходов на электроды и футеровку и т.д. В проекте предусматриваются ФКУ фирмы AREVA—NOKIAN CAPACITORS, которая хорошо зарекомендовала себя в Украине (завод «Азовсталь», Алчевский меткомбинат, НКМЗ и др.). Обследования, проведенные на заводах, эксплуатирующих ФКУ указанной фирмы, показали их высокую эффективность и надежность.

На Рис.4 показаны уровни напряжения на шинах 35 кВ ПС при работе ДСП с ФКУ. Обследования были проведены на одном из заводов Украины в декабре 2008 года на ДСП, оснащенной ФКУ фирмы AREVA—NOKIAN CAPACITORS.

Как видно, при работе ДСП с ФКУ уровень напряжения на шинах 35 кВ относительно стабилен и находится в районе 36,5 кВ, в то время как при плавке без ФКУ уровень напряжения колеблется в пределах 31...36 кВ, снижаясь до 29,5 кВ. Стабилизация напряжения позволяет увеличить количество полезной мощности, вводимой в печь.

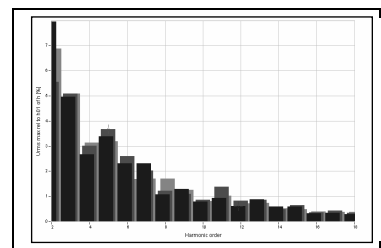


Рис. 2

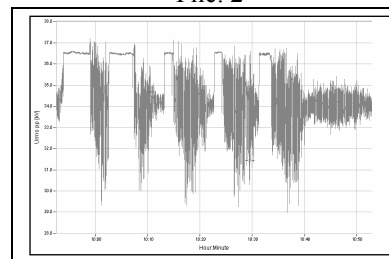


Рис. 3

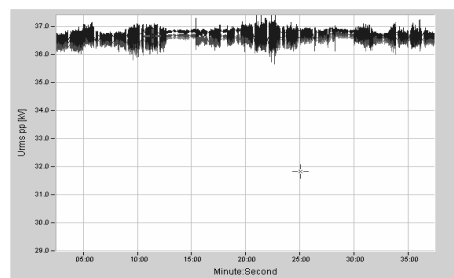


Рис. 4

Следует отметить, что работа ТУРов сопровождается вибрацией и шумами. Поэтому при установке их внутри здания ПС необходимо проверять строительные конструкции ПС на вибрацию и предусматривать при необходимости шумоизоляцию.

Для этого изготовитель ФКУ должен сообщать данные по:

- амплитуде вибрации по вертикали ($\mu\text{м}$);
- амплитуде вибрации по горизонтали ($\mu\text{м}$);
- по доминирующей частоте вибраций (Гц);
- уровню шумов (дБ).

Наличие в проектируемой высоковольтной сети мощных протяженных кабельных линий, сосредоточенных индуктивностей, наличие источников высших гармоник, необходимость частых коммутаций ДСП и УПК, высокая скорость процессов коммутации и т.д. приводят к возникновению внутренних перенапряжений в сети 35 кВ и необходимости разработки мероприятий по их снижению.

Большинство перенапряжений внутреннего происхождения представляет собой высокочастотные быстро затухающие колебания, их частота в десятки раз больше, чем частота нормального режима. Перенапряжения характеризуются кратностью, длительностью воздействия, формой кривой напряжения, частотой воздействия, шириной охвата сети, подвергшейся воздействию перенапряжений.

В таблице приведены наиболее характерные виды перенапряжений и кратность перенапряжений для сетей 35 кВ.

Как видно из таблицы максимальные перенапряжения имеют место при отключении ненагруженных трансформаторов.

Вид перенапряжений	Кратность перенапряжений
Дуговые замыкания на землю (изолированная нейтраль)	3,0...3,5U _ф
Дуговые замыкания на землю (резонансно заземленная нейтраль)	2,6
Дуговые замыкания на землю (резистивно заземленная нейтраль)	2,3...2,4
Включение ВЛ и КЛ при наличии в сети ОЗЗ	3...3,5
Отключение ненагруженных ВЛ и КЛ	3...4,5
Отключение ненагруженных трансформаторов	5,0...6,0

Основная причина – «срез» тока холостого хода до его перехода через нулевое значение.

В процессе проектирования с целью определения величины перенапряжения в сети 35 кВ при отключении ДСП-150 был выполнен расчет величины перенапряжения при отключении печи оперативным выключателем в режиме холостого хода.

«Ожидаемая» величина перенапряжения:

$$U_{max} = \sqrt{U_0^2 + \omega^2 \cdot L_{mp}^2 \cdot I_{cp}^2} = \sqrt{U_0^2 + (L_{mp} / C_{mp}) \cdot I_{cp}^2},$$

где U_0 – мгновенное значение напряжения в момент «среза»;

$\omega = 1 / \sqrt{L_{cp} \cdot C_{mp}}$ – собственная частота колебаний контура;

L_{mp} – индуктивность фазы трансформатора, определяемая как $L_{mp} = \sqrt{2} \cdot U_n / \sqrt{3} \cdot \omega \cdot I_{cp}$, Гн;

I_{cp} – амплитуда тока среза, которая принята равной амплитуде тока холостого хода трансформатора;

C_{mp} – емкость обмотки трансформатора.

Ожидаемая величина перенапряжения составила примерно 130 кВ.

Для снижения перенапряжений у печного трансформатора на стороне 35 кВ предусматриваются R–C цепочки.

Конденсаторы уменьшают волновое сопротивление цепи нагрузки, снижая тем самым перенапряжения, вызванные «срезом» тока, а резисторы способствуют затуханию высокочастотного тока и вместе с конденсаторами уменьшают вероятность повторного зажигания дуги в оперативном выключателе. Уровень ограничения перенапряжений R–C цепочками составляет $(1,8...2,4)U_{\phi}$.

Специфические особенности работы проектируемой сети 35 кВ для ДСП и УПК, о которых упоминалось выше, достаточно часто создают условия для возникновения феррорезонансных перенапряжений.

Толчком для феррорезонанса может являться любое аварийное или коммутационное перенапряжение.

В сетях 35 кВ с изолированной или заземленной через ДГР нейтралью феррорезонанс может развиваться при наличии индуктивности с насыщающимся сердечником, включенной параллельно фазной емкости на землю.

Такой индуктивностью является обмотка высокого напряжения ТН 35 кВ (Рис. 5).

Следует отметить, что обеспечение надежной работы ТН в сетях с изолированной нейтралью состав-

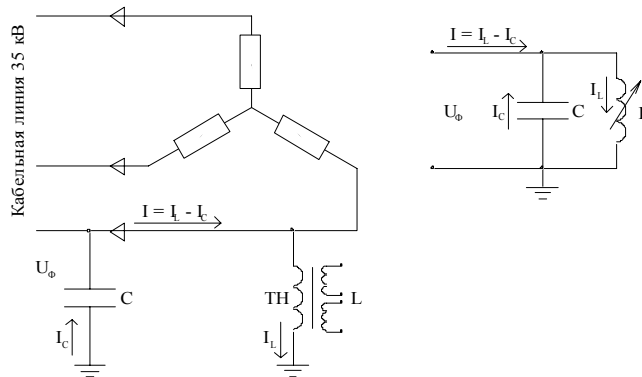


Рис. 5

ляет определенную проблему, которая зависит от локальных повышений напряжения питающей сети в зависимости от подключенной к ней электрической емкости.

Как показывает практика, одной из основных причин высокой повреждаемости ТН являются феррорезонансные процессы (ФР).

Для случаев повреждения ТН характерно:

- повышенное напряжение ($1,1U_n$ и даже выше) на шинах питающей подстанции;
- незначительная нагрузка распределительной сети.

Именно такие условия могут иметь место в проектируемой сети 35 кВ района ПС-110/35/6 кВ.

Превышение напряжения сверх номинального приводит к тому, что намагничивающие токи резко и нелинейно возрастают и при этом создаются условия ФР на индуктивности перевозбужденных ТН.

Следует отметить, что если в спектре напряжения имеются гармонические составляющие, как в рассматриваемом случае, то при феррорезонансе это может также привести к значительным перенапряжениям.

Феррорезонанс токов имеет место при условии:

$$U / \omega \cdot L = U \cdot \omega \cdot C$$

При наличии феррорезонанса токи в первичной обмотке возрастают и он может выйти из строя.

Для защиты ТН 35 кВ от феррорезонанса проектом предусматривается установка в обмотке «открытого треугольника» ТН устройства для предотвращения феррорезонанса *VT guard* фирмы АВВ.

Значительная часть аварийных повреждений связана с возникновением дуговых перенапряжений при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ).

Кратность перенапряжений при изолированной нейтрали, как указано в таблице, достигает величины $(3...3,5)U_\phi$.

Снижение кратности перенапряжений при ОЗЗ может быть достигнуто заземлением нейтрали сети 35 кВ через резонансно настроенный дугогасящий реактор (ДГР) либо заземлением нейтрали через резистор.

Резистивно заземленная нейтраль имеет преимущества, в частности:

- значительно снижается вероятность феррорезонансных явлений;
- кратность перенапряжений при ОЗЗ снижается до $2,3 U_\phi$ и устраняется переход ОЗЗ в 2-х и 3-х фазные замыкания;
- появляется возможность построения простых селективных защит от ОЗЗ.

Выводы:

1. Проведенные на промышленных площадках исследования и выполненные расчеты, в том числе для рассматриваемого случая, подтвердили негативное воздействие ДСП на ПКЭ, нормируемые ГОСТ 13109-97, что приводит также к ухудшению технико-экономических показателей сталеплавильного производства.

2. При проектировании электроснабжения ДСП и УПК необходимо предусматривать многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ), составной частью которых являются тиристорно-управляемые реакторы (ТУРы). За счет обеспечения ПКЭ и, как следствие, улучшения технологических показателей установки (снижение удельного расхода электроэнергии, увеличение производительности печи, сокращение расходов на электроды и т.д.) окупаемость ФКУ составляет не более 2-х лет.

3. Электрические сети с мощными сталеплавильными агрегатами характеризуются наличием значительных емкостей и индуктивностей, а также источников высших гармоник. Поэтому в процессе работы сети возникают внутренние резонансные и коммутационные перенапряжения, особенно опасные для изоляции физически изношенного оборудования в рассматриваемой сети. В связи с этим необходимо выполнять расчеты величины перенапряжений при коммутации конденсаторных батарей, кабельных линий 35 и 110 кВ, печных трансформаторов в режиме холостого хода.

4. С целью снижения перенапряжений в рассматриваемых электрических сетях необходимо предусматривать элегазовые выключатели с управляемой коммутацией.

5. Учитывая сравнительно высокую повреждаемость ТН 35 кВ в сетях с ДСП и УПК из-за возникновения феррорезонансных процессов необходимо предусматривать установку в обмотке «открытого треугольника» ТН 35кВ устройства для предотвращения феррорезонанса.

6. Для снижения перенапряжений при ОЗЗ в сетях 35 кВ ДСП и УПК целесообразно предусматривать заземление нейтрали через резистор.