Назарок В.И., ***Украина***
Антонов В.Г ***Харьков***

ЗАО «Струм»

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 метзаводах «Азовсталь», Алчевский меткобинат, НКМЗ, «Донецксталь», ОАО «Энергомашспецсталь» и др. заводов Украины и России.

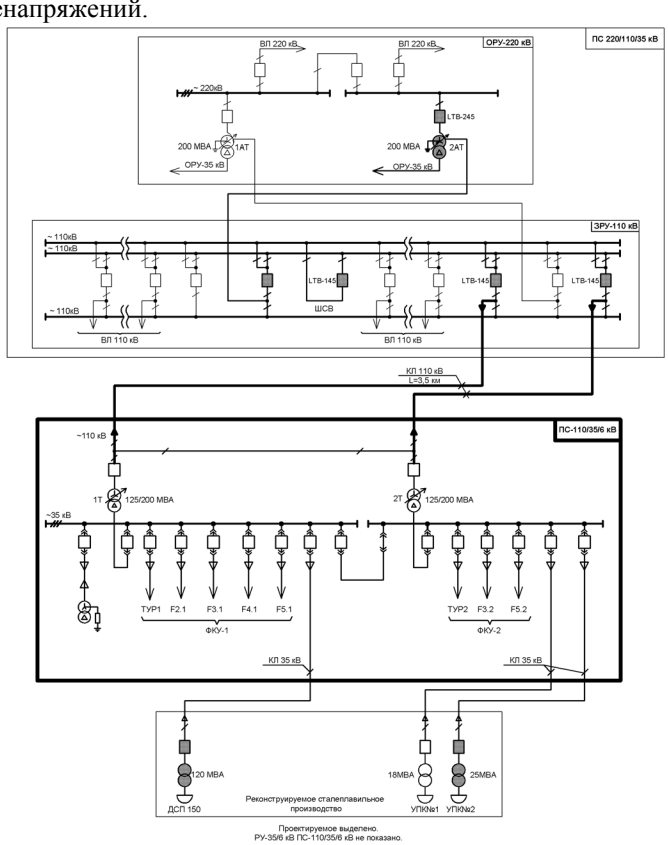

Рис. 1

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.

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.

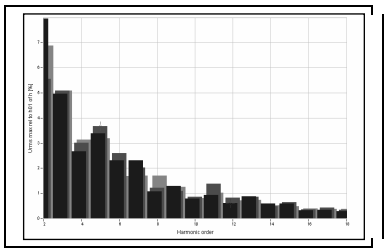

Рис. 2

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.

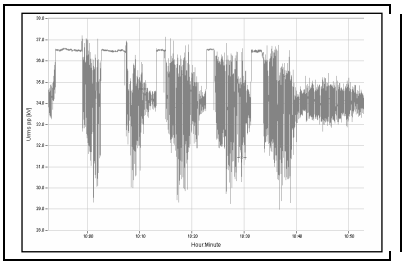

Рис. 3

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.

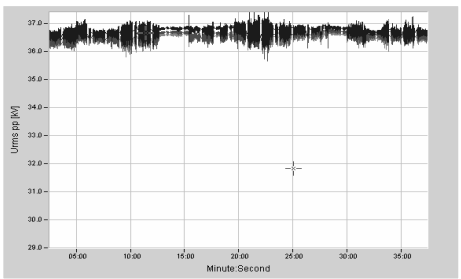

Рис. 4

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 ($\mu м$);
- амплитуде вибрации по горизонтали ($\mu м$);
- по доминирующей частоте вибраций ($Гц$);
- уровню шумов (dB).

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 быстрозатухающие 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.

Вид перенапряжений	Кратность перенапряжений
Дуговые замыкания на землю (изолированная нейтраль)	3,0…3,5Uф
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

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

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

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 $L_{mp} = \sqrt{2} \cdot U_н / \sqrt{3} \cdot \omega \cdot I_{cp}, Гн$;

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 $(1{,}8...2{,}4)U_ф$.

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-

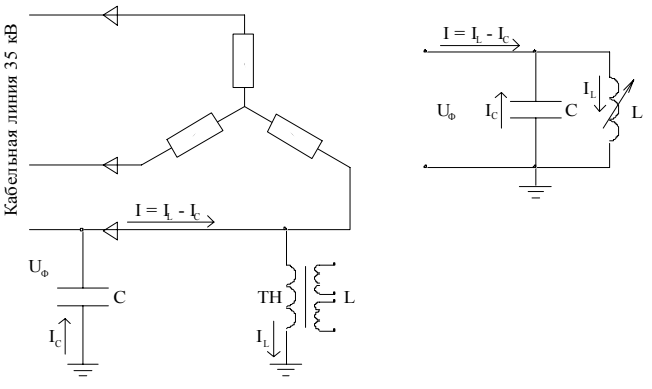

Рис. 5

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 (1,1$U_н$ 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 ABB.

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)$U_ф$.

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 $U_ф$ 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.