

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ ЗА СЧЕТ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Г.П. Корнилов¹, И.Р. Абдулвелеев¹, А.Ю. Коваленко²

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия,

² АНО «Центральная клиническая медико-санитарная часть», г. Магнитогорск, Россия

Электрооборудование современных металлургических агрегатов – электродуговых печей, сортовых и листовых станов горячей и холодной прокатки – за последние десятилетия претерпело ряд существенных изменений. Это отразилось на увеличении единичной мощности трансформаторов и преобразователей, массовом внедрении микропроцессорных систем управления, усложнении схем внутривзаводского электроснабжения со значительной собственной генерацией электрической энергии. В результате электроприводы непрерывных производств, в первую очередь прокатных станов, стали более чувствительны к провалам напряжения и прерываниям электроснабжения. Целью настоящей работы является повышение надежности электроснабжения металлургических агрегатов за счет рационального выбора конфигурации сетей 110 кВ на основе анализа различных схмотехнических решений. Для объективной оценки последствий аварийных ситуаций обычно используют два показателя – ток короткого замыкания и остаточные напряжения у ответственных потребителей. Доказано, что наиболее радикальным средством снижения первого показателя и повышения второго является преобразование сложноразветвленной сети 110 кВ в независимые контуры с простой конфигурацией. При этом обеспечивается существенное уменьшение токов короткого замыкания, сокращение числа аварийных ситуаций, а также снижение потерь активной мощности в сетях 110 кВ. Суммарный годовой эффект от внедрения предложенных мероприятий превышает 40 млн руб.

Ключевые слова: сложноразветвленная электрическая сеть, провал напряжения, сброс нагрузки, собственные электростанции, надежность электроснабжения, модернизация электрической сети.

Введение

Короткие замыкания и разряды атмосферного электричества в сетях 110–220 кВ вызывают наиболее значительные по масштабам и тяжести последствия для промышленных предприятий на территории РФ. Рассмотрим эти вопросы на примере одного из крупнейших металлургических предприятий Российской Федерации – ПАО «ММК». Повреждение на одной из внешних питающих линий, а всего их более 10, приводит к существенным провалам напряжения на всех электроприемниках, электрически связанных между собой. Число фактов глубоких снижений напряжения может достигать до 100 случаев в год, примерно 40 % из которых возникают по причине коротких замыканий на линиях энергосистемы предприятия [1]. Средняя продолжительность простоя прокатного стана составляет около часа, а при серьезном нарушении технологии – с заменой поврежденных валков, удалением застрявшей полосы и т. д. – продолжительность простоев существенно увеличивается до нескольких часов. Снижение выпуска продукции составляет порядка 100–150 т проката за первые 15 мин простоя стана горячей прокатки и 50 т высококоррелябельного листа – для стана холодной прокатки. Известны случаи, когда по при-

чине только двух аварий недовыработка предприятия превышала 3000 т проката [2].

Повышенная чувствительность систем промышленного электроснабжения к внешним повреждениям питающих линий, вызывающим снижению напряжения, обусловлена широким внедрением микропроцессорной техники и силовой электроники в системы управления производственных процессов металлургических предприятий. В [2, 3] приведены примеры разрушительного воздействия провалов напряжения на технологические процессы различных производств, а также отмечена серьезность понесенных ими финансовых потерь. Таким образом, проблема качества электроснабжения промышленных предприятий является актуальной задачей и один из действенных рычагов ее решения – это повышение надежности за счет использования различных схмотехнических решений.

1. Характеристика объекта исследования

Характерной тенденцией последних десятилетий является все более глубокая переработка исходного сырья и доведение товарной продукции до потребителя. Реализация программы технического перевооружения рассматриваемого пред-

приятая, проводимая в период с 1995 г. по 2020 г., позволила преодолеть рубеж годового выпуска стали в 12 млн т, а готовой товарной продукции – 10 млн т. Повышение эффективности производства достигнуто за счет замены мартеновских печей на конвертеры, внедрения машин непрерывного литья заготовок, пуска в эксплуатацию современных прокатных станков, силовые электроприводы которых выполнены на новой элементной базе [4–6].

Это привело к значительному росту электрической нагрузки и электропотребления предприятия, в результате которого получасовой максимум нагрузки превысил величину в 1 млн кВт. Изменение состава электроприемников привело к увеличению доли электропотребления сталеплавильных и прокатных цехов с 25 до 40 %. В данных цехах сосредоточены наиболее энергоемкие технологические и силовые электроустановки с резкопеременным и ударным характером нагрузки, а также в большом количестве имеются электроприемники с повышенной чувствительностью к провалам напряжения в сети [7–10]. Все это предъявляет жесткие требования к надежности внутриводской системы электроснабжения, а также к передаче электроэнергии транзитом по высоковольтным сетям предприятия в городскую инфраструктуру.

Особенностью электроснабжения металлургического предприятия является все более возрастающая выработка собственной электроэнергии, достигающая порядка 70–75 % от потребляемой мощности. Собственные электростанции работают параллельно с магистральными сетями энергосистемы ФСК ЕЭС России. При этом протяженность внутренних воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) предприятия достигает несколько сотен

километров, а кабельных линий среднего напряжения – порядка 8000 км. Производство собственной электроэнергии обеспечивается на тепловой электроцентрали (ТЭЦ), центральной (ЦЭС) и газопоршневой (ГПЭС) электростанциях, паровоздушной (ПВЭС), пароперегревающей установке (ЭС-ППУ) и мини-ТЭЦ (рис. 1).

Увеличение числа генерирующих станций и ввод в эксплуатацию современных технологических агрегатов и комплексов с высокой степенью автоматизации сделали вопросы обеспечения надежности электроснабжения весьма актуальными и практически значимыми. Система внутриводского электроснабжения перестала отвечать задачам модернизации металлургического производства. В отличие от 1960-х годов, когда эти вопросы решались индивидуально по мере реконструкции или пуска отдельных энергоемких приемников (блюминг, слябинг и т. д. [10]), в нынешних условиях решение проблемы может быть обеспечено при реконструкции всей системы внутриводского электроснабжения. Существующие режимы потокораспределения отмечены значительными потерями мощности и электроэнергии. Провалы напряжения, вызванные короткими замыканиями в сетях 110–220 кВ, были причиной отключений ответственных потребителей и, как следствие, аварийных остановок большинства металлургических цехов [11–15].

С целью повышения надежности и эффективности внутриводского электроснабжения была предусмотрена и успешно проведена реконструкция высоковольтных сетей, направленная на изменение конфигурации внутриводской сети 110 кВ, а также на обновление силового электрооборудования, систем релейной защиты и автоматики узловых подстанций.

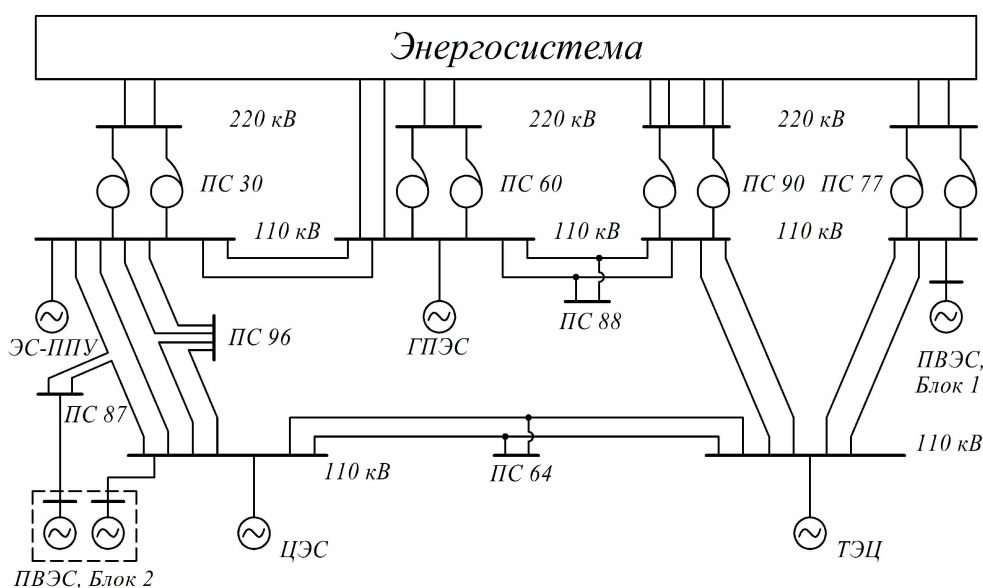


Рис. 1. Исходная схема сложной замкнутой сети промышленного предприятия

2. Последствия коротких замыканий в высоковольтных сетях исходной системы электроснабжения

Как уже отмечалось, основной причиной глубоких снижений напряжения на шинах электроприемников являются короткие замыкания, разряды атмосферного электричества в сетях 110–220 кВ, а также ошибочные действия персонала при оперативных переключениях, например, ошибочное включение заземляющих ножей на сборных шинах [16–19].

В табл. 1 приведены данные о наиболее значимых аварийных ситуациях в заводских сетях 110 кВ за один календарный год, а также величинах сброса нагрузки (ΔP) и времени (T) на восстановление производственного процесса до нормального состояния.

Например, интенсивный сброс нагрузки комбината из-за короткого замыкания на ВЛЭП-110 кВ «ПС 87 – ЦЭС» (№ 2) явился следствием нескольких факторов:

1) совмещением во времени вынужденных остановок главных электроприводов станов в четырех прокатных цехах;

2) нештатным прекращением работы дуговых сталеплавильных печей и термических агрегатов «Печь-ковш» в электросталеплавильном и кислородно-конвертерном цехах с уменьшением нагрузки со 170 до 34 МВт.

Исходная система внутривзаводского электроснабжения представляла собой «единую шину», сконцентрированную на ограниченной территории, к которой подключены понизительные под-

станции и автотрансформаторы связи с линиями 220 кВ (см. рис. 1). Значительные генерирующие мощности собственных электростанций, а также близость к мощному системному источнику явились причиной того, что короткое замыкание в любой точке сопровождалось протеканием опасно больших токов и глубоким снижением напряжения [20, 21]. Об этом свидетельствуют расчетные значения остаточных напряжений в основных узлах сети 110 кВ исходной схемы (см. рис. 1), которые приведены в табл. 2. Эти результаты получены с помощью программы ТКЗ-3000, предназначенной для расчета токов короткого замыкания и адаптированной к условиям рассматриваемого предприятия.

Реальные значения остаточных напряжений на узловых подстанциях, зафиксированные с помощью приборов регистрации параметров аварийных событий, подтверждают результаты расчета. Например, при возникновении КЗ на шинах 110 кВ ПС 77 или ПС 90 напряжение на соседней системе шин снижается до 40–55 кВ и уровень напряжения в цеховых сетях 6–10 кВ оказывается недопустимо низким для обеспечения нормальной работы электроприемников.

Вторым существенным недостатком исходной схемы явилось заметное увеличение токов одно- и трехфазных КЗ, которые превысили номинальные токи отключения (25; 31,5 и 40 кА) установленных выключателей (табл. 3), что отрицательно повлияло на надежность электроснабжения.

Таким образом, наличие значительных провалов напряжения и дальнейшая невозможность эксплуатации существующего оборудования стали

Таблица 1

Значимые аварийные события

№	Характеристика событий		
	Место аварии	ΔP , МВт	T , мин
1	ВЛЭП-110 кВ «ПС 30 – ПС 29*», № 1	280	75
2	ВЛЭП-110 кВ «ПС 87 – ЦЭС»	181	65
3	ВЛЭП-110 кВ «ПС 30 – ПС 60», № 1	229	90
4	Трансформатор 40 МВА, ТЭЦ	204	80
5	Сборные шины 110 кВ, ЦЭС	117	20
6	Трансформатор 80 МВА, ТЭЦ	230	90
7	ВЛЭП-110 кВ «ПС 90 – ПС 63*», № 2	130	70
8	КЛЭП-110 кВ «ПС 30 – ПС 60», № 2	48	10

*ПС 29 и ПС 63 – цеховые подстанции, на схеме рис. 1 не показаны.

Таблица 2

Остаточные напряжения в замкнутой сети 110 кВ при трехфазном КЗ

Точка КЗ	Остаточное напряжение, кВ					
	ТЭЦ	ЦЭС	ПС 30	ПС 60	ПС 77	ПС 90
ТЭЦ	0	21,1	22,7	35,8	30,6	54,5
ЦЭС	15,4	0	12,7	28,0	41,2	55,6
ПС 30	20,7	16,4	0	22,6	44,7	54,8
ПС 60	27,4	24,4	15,1	0	48,9	49,0
ПС 77	6,7	25,9	26,8	38,5	0	55,3
ПС 90	27,2	34,0	29,9	28,9	47,6	0

Таблица 3

Токи КЗ в узлах сети 110 кВ для схемы на рис. 1

Узел сети	Ток КЗ, кА	
	Однофазный	Трехфазный
ТЭЦ	41,6	43,4
ЦЭС	46,5	44,5
ПС 30	47,1	44,5
ПС 60	43,0	42,2
ПС 77	33,9	36,8
ПС 90	33,3	34,1

предпосылкой для изменения конфигурации питающих сетей 110 кВ внутривзводского электропитания.

3. Разделение сложноразветвленной сети на два независимых контура

Наиболее эффективным и практически реализуемым способом для достижения поставленных целей стало разделение сложноразветвленной сети 110 кВ на два независимых контура (рис. 2). Предварительный анализ последствий такого преобразования проводился с учетом телеметрических данных, зафиксированных в автоматизированной системе диспетчерского управления энергохозяйством предприятия. Наиболее рациональным местом разделения сложноразветвленной сети оказался участок между подстанциями 60 и 90, а также между ЦЭС и ПС64. В результате образовались два «полукольца» – с одной стороны «ЦЭС – ПС 30 – ПС 60», а с другой стороны «ТЭЦ – ПС 77 – ПС 90», при этом связь по напряжению 110 кВ между ними устранена полностью; эти два контура соединены между собой на стороне 220 кВ внешней энергосистемы.

Положительный эффект размыкания кольца

110 кВ на два независимых контура определяется следующими достигнутыми результатами.

– Нормальные токовые нагрузки ЛЭП и аварийные токи отключения коммутационных аппаратов значительно снизились (рис. 3) и в случае аварийных режимов не превышают допустимых значений (табл. 4).

– При разделении на два полукольца в каждом из них присутствует мощный источник в виде заводской электростанции ЦЭС или ТЭЦ, а связь с внешней энергосистемой осуществляется через узловые подстанции – в одном полукольце ПС 77 и ПС 90, а в другом – ПС 30 и ПС 60. Это существенно повышает надежность работы ответственных потребителей, так как вероятность выделения ТЭЦ и ЦЭС на автономную работу при коротком замыкании в сети 110 кВ сведена к минимуму.

– Провалы напряжения в сети вблизи короткого замыкания остаются, как и прежде, глубокими, однако снижение напряжения в другом замкнутом контуре не будет столь значительным (см. табл. 4) и это не приведет к аварийной ситуации (рис. 4). Технологический процесс в цехах, электропитание которых осуществляется от неповрежденной сети, не прерывается. Напряжения на шинах

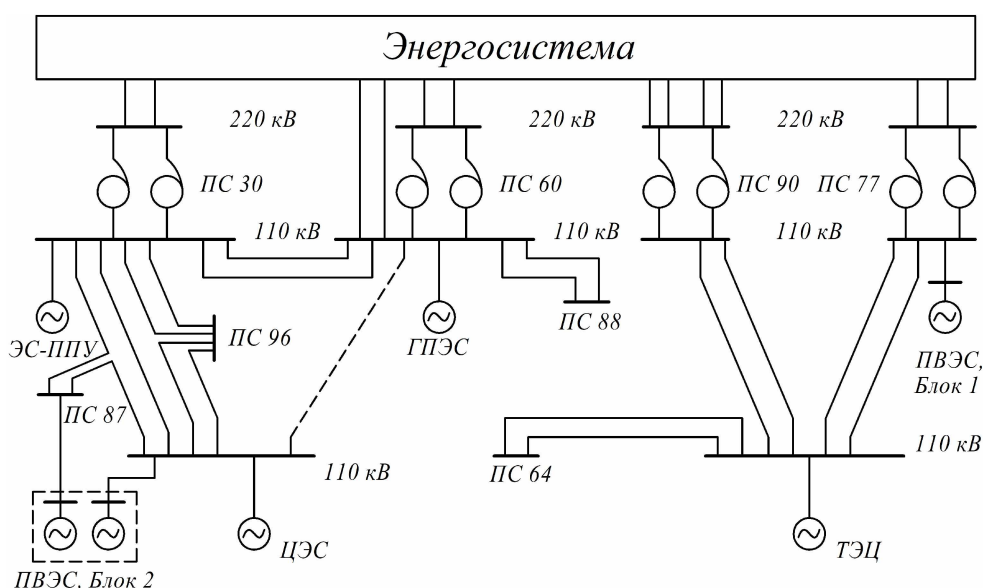


Рис. 2. Преобразованная двухконтурная схема сетей 110 кВ

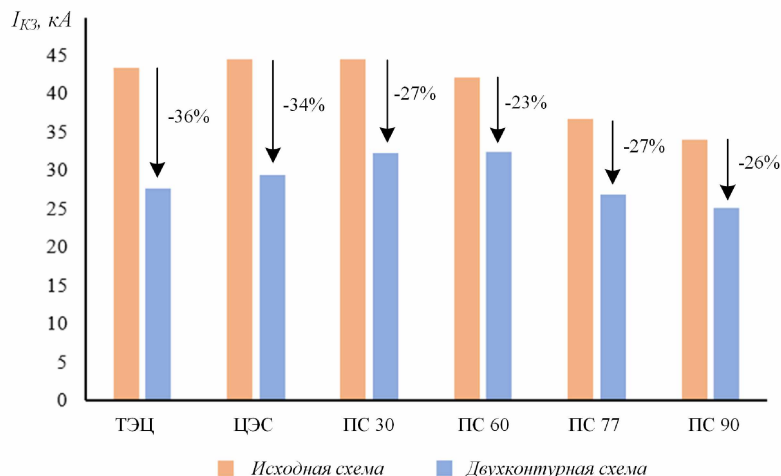


Рис. 3. Сравнение токов трехфазного КЗ исходной схемы и двухконтурной схемы в узлах сети 110 кВ

Таблица 4

Остаточные напряжения в двухконтурной сети 110 кВ при трехфазном КЗ

Точка КЗ	Остаточное напряжение, кВ					
	«ТЭЦ – ПС 77 – ПС 90»			«ЦЭС – ПС 30 – ПС 60»		
	ТЭЦ	ПС 77	ПС 90	ЦЭС	ПС 30	ПС 60
ТЭЦ	0	16,1	48,7	94,8	91,0	90,2
ПС 77	9,3	0	51,3	93,5	89,5	88,7
ПС 90	38,2	46,1	0	87,7	83,0	82,0
ЦЭС	95,7	96,1	93,6	0	6,2	18,7
ПС 30	95,1	95,6	93,0	19,1	0	17,3
ПС 60	93,7	94,2	91,5	27,3	14,0	0

Таблица 5

Загрузка ЛЭП-110кВ в нормальном режиме для двух вариантов сети

№	Элементы сети	Длительно допустимый ток, %	
		Замкнутая схема	Двухконтурная схема
1	«ЦЭС – ПС 96»	17	18
2	«ПС 30 – ПС 60»	15	17
3	«ТЭЦ – ПС 77»	18	18
4	«ТЭЦ – ПС 90»	16	18
5	«ТЭЦ – ПС 64»	3	–
6	«ПС 90 – ПС 88»	4	–

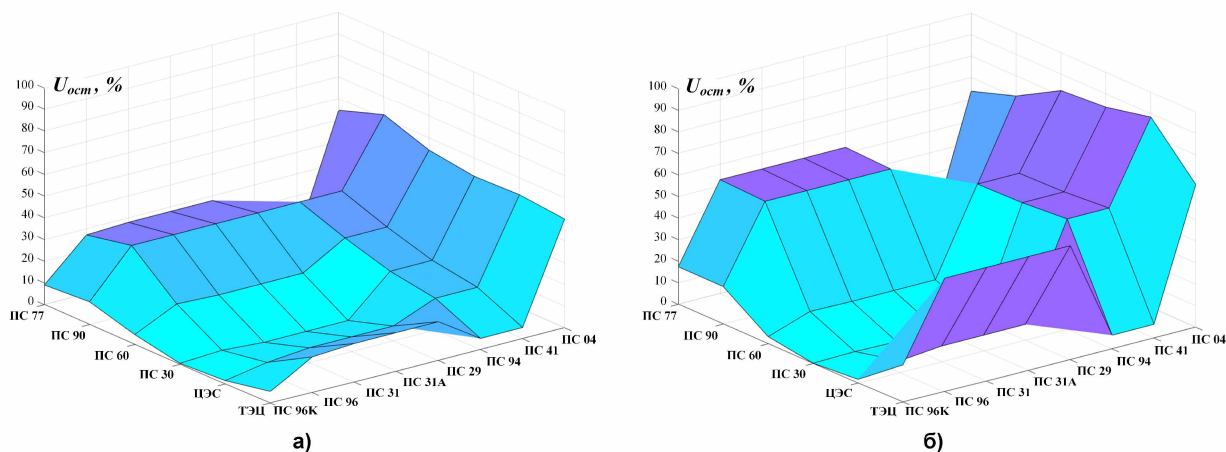


Рис. 4. Зависимости остаточных напряжений для замкнутой сети (а) и для преобразованной двухконтурной схемы (б) в узлах сети 110 кВ

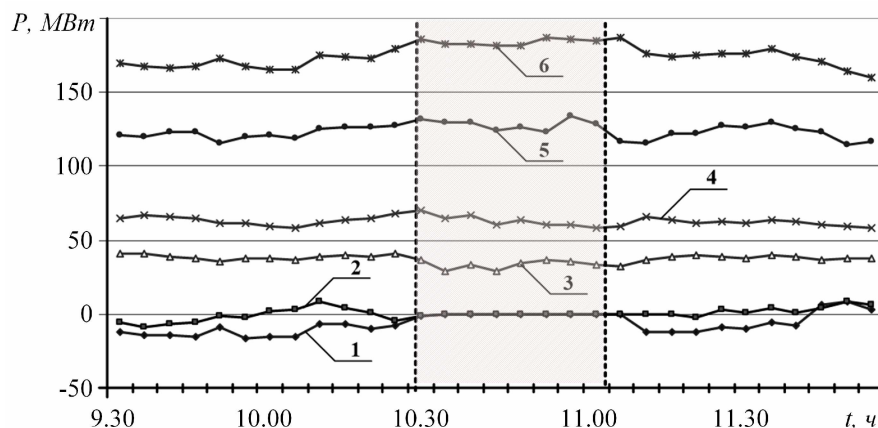


Рис. 5. Потоки активной мощности в ЛЭП-110 кВ: 1 – «ТЭЦ – ЦЭС»; 2 – «ПС90 – ПС60»; 3 – «ТЭЦ – ПС77»; 4 – «ТЭЦ – ПС90»; 5 – «ПС30 – ПС60»; 6 – «ЦЭС – ПС30»

ответственных потребителей 6–10 кВ в нормальных и послеаварийных режимах соответствуют требованиям ГОСТ 32144–13 (EN 50160:2010).

– Предложенный вариант реконструкции сложноразветвленной сети 110 кВ не вызовет значительных изменений в перераспределении мощности и не приведет к перегрузке линий (табл. 5).

– В результате реконструкции ПС 64 и ПС 88 получают энергию с одного направления, что существенно упрощает настройку релейной защиты.

Таким образом, преобразование сложноразветвленной сети напряжением 110 кВ на два независимых контура является достаточно эффективным решением, поскольку обеспечивает повышение надежности электроснабжения ответственных потребителей и уменьшение токов в случае коротких замыканий.

Надо отметить, что наряду с предлагаемым «жестким» и невозвратным разделением сложной системы в отдельных случаях для более простых схем и с меньшим числом генерирующих узлов положительный результат достигается за счет применения разделительной автоматики [22].

4. Эксперимент по разделению сложноразветвленной сети 110 кВ металлургического предприятия

Для проверки опытным путем правильности предварительных теоретических расчетов был спроектирован и проведен натурный эксперимент в реальных условиях действующего металлургического предприятия с непрерывным производством. Цель эксперимента заключалась в том, чтобы подтвердить отсутствие нежелательных последствий в отношении токораспределения и уровней напряжения в каждом контуре схемы 110 кВ, а также оценить размеры перетоков мощности из одного контура в другой при наличии электрической связи через распределительные сети 6–10 кВ. Эти перетоки вызваны неравенством исходных параметров левого и правого полукольца, в том числе различными значениями коэффициентов

трансформации автотрансформаторов 220/110 кВ ПС 30, 60, 77 и 90, протяженностью линий и т. д.

Эксперимент был реализован после длительного и ответственного этапа внесения изменений в действующую схему электроснабжения предприятия, а также настройки контрольно-измерительных приборов для регистрации параметров в сети. В результате поэтапного отключения ЛЭП-110 кВ «ЦЭС – ТЭЦ» (№ 1, 2) со стороны ЦЭС и «ПС 60 – ПС 90» (№ 1, 2) со стороны ПС 90 исходная сложноразветвленная сеть была преобразована в два не связанных между собой контура «ЦЭС – ПС30 – ПС60» и «ТЭЦ – ПС77 – ПС90». Продолжительность эксперимента составила 55 мин, после чего исходное состояние сложноразветвленной сети 110 кВ было восстановлено в полном объеме.

В ходе эксперимента были получены результаты, подтверждающие правомерность исходных теоретических положений, а именно:

1) линейные токи ЛЭП-110 кВ, соединяющих ТЭЦ и ЦЭС с узловыми подстанциями не превысили предельно допустимых значений;

2) потоки активной мощности в ЛЭП-110 кВ практически не изменились, о чем свидетельствуют результаты, показанные на рис. 5.

Таким образом, результаты эксперимента позволили сделать выводы о том, что в существующей сложноразветвленной схеме внутриводского электроснабжения имеются все необходимые и достаточные условия для ее разделения на два независимых контура. При этом перетоки мощности из одного контура в другой и уровни напряжения во всех точках сети удовлетворяют техническим условиям эксплуатации оборудования.

5. Технико-экономический эффект от разделения сети 110 кВ металлургического предприятия

Опыт эксплуатации преобразованной схемы электроснабжения в течение более трех лет позволяет отметить положительные результаты проведенной реконструкции. Во-первых, не менее чем в

2 раза повысилась надежность электроснабжения ответственных потребителей при случайных коротких замыканиях по сравнению с исходной схемой. Если раньше повреждение в какой-либо точке исходной схемы приводило к существенным провалам напряжения всех ответственных потребителей, то после разделения на два контура повреждения, происходящие в одном контуре, практически не сказываются на уровне напряжения другого контура. Можно констатировать, что взаимное влияние двух контуров 110 кВ через сети 220/500 кВ внешней энергосистемы максимально ослаблено.

С помощью программы ТКЗ-3000 рассчитаны остаточные напряжения для трех состояний электрической схемы 110 кВ: 1 – исходная схема до аварии; 2 – короткое замыкание на ПС 30; 3 – при тех же условиях для двухконтурной схемы (табл. 6). Наблюдается также снижение токов КЗ на ПС 30 с 47,8 до 35,7 кА.

В результате разделения исходной сложнозамкнутой сети 110 кВ на 2 замкнутых контура произошло существенное улучшение работы силового электрооборудования в нормальных и аварийных режимах. Как уже было отмечено, произошло снижение токов короткого замыкания в линиях 110 кВ, соединяющих заводские станции ТЭЦ и ЦЭС с узловыми подстанциями, в среднем на 30–35 %, а токи на узловых подстанциях снизились на 23–27 %.

Благодаря произведенной реконструкции значительно сократилось количество выключателей с недостаточной отключающей способностью и практически отпал вопрос о замене таких выключателей.

В результате улучшения работы релейной защиты значительно сократилось количество отказов и ложных срабатываний.

Разделение исходной схемы на два независимых контура не вызвало существенных изменений в нагрузках линий 220 кВ, питающих узловые подстанции 30, 60, 90 и 77 (рис. 6). Отмечено некоторое перераспределение токов в ЛЭП-110 кВ, так в линиях сети «ЦЭС – ПС30 – ПС60» произошло увеличение токов, а в линиях «ПС77 – ТЭЦ – ПС90» – их снижение практически на ту же величину. Изменения в токораспределении привели к изменениям потерь активной мощности и энергии в основных элементах системы 110/220 кВ.

В линиях заводского электроснабжения произошло общее снижение потерь примерно на 240 кВт в результате того, что положительный эффект от снижения токов в линиях от ТЭЦ к подстанциям 77 и 90 оказался значительно больше по сравнению с отрицательным эффектом от увеличения токов в линиях «ЦЭС – ПС 30 – ПС 60».

Отмечено также снижение электрических потерь в автотрансформаторах узловых подстанций примерно на 40 кВт, несмотря на увеличение потоков мощности и токов в городской энергоузел. Основной причиной этого стало уменьшение сопротивления связи заводской сети с энергосистемой при переходе на работу с двумя автотрансформаторами на каждой из подстанций. В исходной схеме работа одного автотрансформатора (второй был включен без нагрузки) служила средством некоторого ограничения токов КЗ. Таким образом, общее снижение активных потерь в ре-

Таблица 6

Остаточные напряжения сети 110 кВ при трехфазном КЗ на ПС 30

Схема	Остаточное напряжение, кВ					
	30	ЦЭС	60	ТЭЦ	77	90
До аварии	115,9	115,8	115,6	114,6	114,3	115
Исходная	0	13,6	20,2	29,7	34,3	37,9
Двухконтурная	0	6,0	18,5	95,3	94,2	90,4

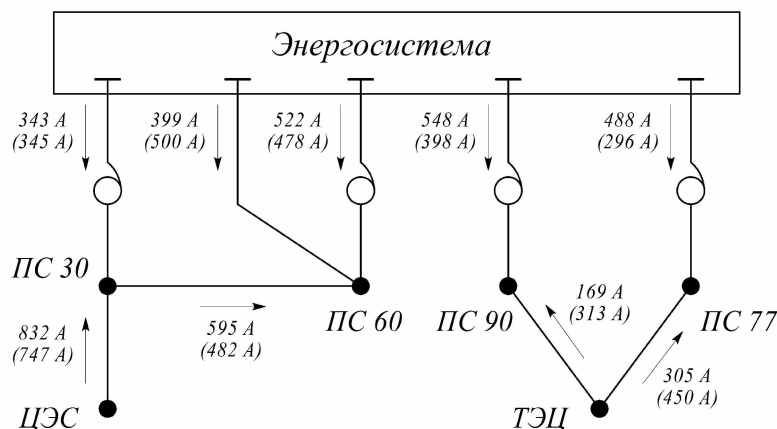


Рис. 6. Токи в автотрансформаторах ПС 30, 60, 77, 90 и ЛЭП-110кВ для преобразованной и исходной схем (значения в скобках соответствуют исходной схеме)

зультате разделения внутривзаводского электро-снабжения 110 кВ на два замкнутых контура со-ставило в среднем 280 кВт, или 2 млн кВт·ч в год.

Выводы

1. Система электроснабжения крупного ме-таллургического предприятия имеет сложную раз-ветвленную сеть, представляющую собой «единую шину», к которой присоединены как собственные источники (ТЭЦ, ЦЭС и т. д.), вырабатывающие электроэнергию на вторичном попутном сырье, так и внешние магистральные линии 220/500 кВ ФСК ЕЭС. Такая сеть отличается повышенной чувствительностью к коротким замыканиям, кото-рые сопровождаются существенными провалами напряжения и отключением ответственных потре-бителей.

2. Как показал предварительный анализ и проведенный расчет различных вариантов по-строения схем электроснабжения, наилучшим схемотехническим решением является разделение исходной сложноразветвленной сети 110 кВ на два независимых контура.

3. На действующем оборудовании успешно проведен эксперимент по разделению замкнутой схемы 110 кВ на два полукольца, в каждом из ко-торых находится собственный источник электро-энергии и две узловые подстанции 220/110 кВ свя-зи с энергосистемой.

4. В результате проведенной реконструкции существенно, примерно в 2 раза, повысилась на-дежность системы электроснабжения, особенно ответственных потребителей с непрерывным про-изводством (прокатные станы, травильные линии и т. д.). Произошло заметное снижение токов КЗ в сетях 110 кВ, а также снижение активных потерь в линиях и трансформаторах.

5. Суммарный годовой эффект в результате реконструкции схемы электроснабжения превы-шает 40 млн руб. в год. Он определяется уменьше-нием аварийных отключений потребителей при провалах напряжения, а также снижением потерь электроэнергии в элементах системы электро-снабжения.

Литература

1. Yin, R. *Metallurgical Process Engineering* / R. Min. – Metallurgical Industry Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. – 328 p.

2. Проблемы качества внутривзаводского элек-троснабжения и их решение на примере ОАО «ММК» / Ю.П. Журавлев, А.Ю. Коваленко, Г.П. Кор-нилов и др. // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2011. – № 4. – С. 26–30.

3. *Steel Statistical YearBook*. – Baijing: World Steel Association, 2018. – 126 с.

4. Bollen, M.H. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions* / M.H. Bol-len. – Wiley-IEEE Press, 2000. – 672 p.

5. *Электрооборудование современных цехов ОАО «ММК»* / Е.Я. Омельченко, А.Н. Козин, В.Н. Маколов и др. // *Электротехнические систе-мы и комплексы*. – 2014. – № 1 (22). – С. 43–46.

6. Tupkary, R.H. *Modern Steel Making Hand-book* / R.H. Tupkary, V.R. Tupkary. – Mercury Learning & Information, 2017. – 660 p. DOI: 10.1109/iecon.2001.975887

7. *A generalized control scheme for active front-end multilevel converters* / F. Hernandez, T. Moran, J. Espinoza, J. Dixon // *IECON'01, 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Denver, USA, 2001*. – Vol. 2. – P. 915–920.

8. Schael, M. *Industrial Electric Grid Evaluation Regarding Harmonics Based on Measurement Data* / M. Schael, C. Sourkounis, A. Rogat, C. Neumann // *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Anacapri, 2016*. – P. 282–287. DOI: 10.1109/speedam.2016.7525902

9. Николаев, А.А. *Управление устройством РПН сетевого трансформатора с учетом режи-мов работы электросталеплавильного комплекса* / А.А. Николаев, В.В. Анохин // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Се-рия «Энергетика»*. – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 61–74. DOI: 10.14529/power180308

10. Веников, В.А. *Анализ поведения электри-ческой системы при резких изменениях нагрузки* / В.А. Веников, Д.А. Федоров, М.В. Мачинский // *Электричество*. – 1959. – № 4. – С. 16–22.

11. Зацаринная, Ю.Н. *Особенности эксплуа-тации релейной защиты воздушных линий, выпол-ненной на разной элементной базе* / Ю.Н. Заца-ринная, Р.Р. Рахматуллин, М.Н. Хабибуллин, А.Г. Логачева // *Вестник Иркутского государ-ственного технического университета*. – 2017. – Т. 21, № 9. – С. 139–145. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-9-139-145

12. Zhan, L. *Characteristic of Voltage Dips (Sags) in Power Systems* / L. Zhan and M. H. J. Bollen // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2000. – Vol. 15, no. 2. – P. 827–832. DOI: 10.1109/61.853026

13. Hsu, C.-T. *Voltage Sags Improvement for the High-Tech Industrial Customers by Using Co-generation System* / C.-T. Hsu // *TENCON 2007 – 2007 IEEE Region 10 Conference*. – Taipei, 2007. – P. 1–4. DOI: 10.1109/tencon.2007.4428914

14. Пупин, В.М. *Анализ провалов напряжений в питающих сетях предприятий и способы защи-ты электрооборудования* / В.М. Пупин, Д.С. Куф-тин, Д.О. Сафонов // *Электрооборудование: экс-плуатация и ремонт*. – 2013. – № 4. – С. 40–46.

15. Качанов, А.Н. *Оценка влияния провалов напряжения на работу электротехнического ком-плекса* / А.Н. Качанов, В.Л. Кукоба // *Вести выс-ших учебных заведений Черноземья*. – 2008. – № 2 (12). – С. 22–24.

16. Goswami, A.K. *Minimization of Voltage*

Sag Induced Financial Losses in Distribution Systems Using FACTS Devices / A.K. Goswami, C.P. Gupta, G.K. Singh // Electric Power Systems Research. – 2011. – 81 (3). – P. 767–774. DOI: 10.1016/j.epsr.2010.11.003

17. Lim, P. K. *Understanding and Resolving Voltage Sag Related Problems for Sensitive Industrial Customers / P. K. Lim and D. S. Dorr // 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, Singapore, 2000. – Vol. 4. – P. 2886–2890. DOI: 10.1109/pesw.2000.847343*

18. Федотов, А.И. *Влияние провалов напряжения при внешних коротких замыканиях на режимы работы синхронных двигателей / А.И. Федотов, Р.М. Мударисов // Известия высших учебных заведений, Электромеханика. – 2012. – № 3. – С. 71–76.*

19. Штиганович, А.Н. *О восстановлении электроснабжения при кратковременных провалах напряжения / А.Н. Штиганович, В.И. Зацепина,*

И.Г. Шилов // Промышленная энергетика. – 2008. – № 10. – С. 15–17.

20. Khramshin, T.R. *Electromagnetic Compatibility of High Power STATCOM in Asymmetrical Conditions / T.R. Khramshin, I.R. Abdulvelev, G.P. Kornilov // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Omsk. – 2015. – P. 1–6. DOI: 10.1109/sibcon.2015.7146966*

21. Храмушин, Т.Р. *Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электротехнических комплексов / Т.Р. Храмушин, И.Р. Абдулвелеев, Г.П. Корнилов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 82–93. DOI: 10.14529/power150110*

22. Илюшин, П.В. *Анализ особенностей выбора устройств РЗА в распределительных сетях с собственными генерирующими объектами небольшой мощности / П.В. Илюшин // Электрические станции. – 2017. – № 9. – С. 29–34.*

Корнилов Геннадий Петрович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; korn_mgn@mail.ru.

Абдулвелеев Ильдар Равильевич, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; leggyild@mail.ru.

Коваленко Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, директор, АНО «Центральная клиническая медико-санитарная часть», г. Магнитогорск.

Поступила в редакцию 18 сентября 2019 г.

DOI: 10.14529/power190407

IMPROVING THE RELIABILITY OF STEEL PRODUCING UNITS ELECTRIC SUPPLY WITH SCHEMATIC DESIGN SOLUTIONS

G.P. Kornilov¹, korn_mgn@mail.ru,
I.R. Abdulvelev¹, leggyild@mail.ru,
A.Yu. Kovalenko²

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation,

² Autonomous Non-Profit Organization “Central Clinical Health Unit”, Magnitogorsk, Russian Federation

The electrical equipment of modern metallurgical units - electric arc furnaces, section and sheet mills of hot and cold rolling, has undergone a number of significant changes over the past decades. This resulted in an increase in the unit power of transformers and converters, the massive introduction of microprocessor control systems, and the complication of internal plant power supply schemes with significant own generation of electric energy. Consequently, the electric drives of continuous production, primarily rolling mills, have become more sensitive to voltage dips and interruptions in power supply. The aim of this work is to increase the reliability of power supply to metallurgical units using the rational choice of the configuration of 110 kV networks based on the analysis of various circuitry solutions. The consequences of emergency situations are usually assessed based

on two indicators – short-circuit current and residual voltages of responsible consumers. It has been proved that the most radical way to reduce the first indicator and increase the second is to convert a 110 kV complex closed circuit into independent circuits with a simple configuration. This provides for a significant reduction in short-circuit currents, a reduction in the number of emergency situations, as well as a reduction in active power losses in 110 kV networks. The total annual effect of the implementation of the proposed activities exceeds 40 million rubles.

Keywords: meshed system, voltage dip, load drop, reliability of power grids, revamping of the electrical grid.

References

1. Yin R. *Metallurgical Process Engineering*. Metallurgical Industry Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. 328 p.
2. Zhuravlev Y.P., Kovalenko A.Y., Kornilov G.P., Slavgorodskiy V.B., Nikolaev A.A., Khrumshin T.R. [Quality Problems of Internal Power Supply and Their Solution on the Example of the JSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works”]. *Russian Electromechanics*, 2011, no. 4, pp. 26–30 (in Russ.)
3. *Steel Statistical YearBook*. Baijing, World Steel Association, 2018. 126 p.
4. Bollen M.H. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. Wiley-IEEE Press, 2000. 672 p.
5. Omelchenko E.Y., Kozin A.N., Makolov V.N., Bovshik P.A., Popov S.N. [Electrical Equipment of Modern Shops of Magnitogorsk Iron and Steel Works]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2014, no. 1 (22), pp. 43–46. (in Russ.)
6. Tupkary R.H., Tupkary V.R. *Modern Steel Making Handbook*. Mercury Learning & Information, 2017. 660 p.
7. Hernandez F., Moran T., Espinoza J., Dixon J. A Generalized Control Scheme for Active Front-end Multi-level Converters. *IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Denver, USA, 2001, vol. 2, pp. 915–920. DOI: 10.1109/iecon.2001.975887
8. Schael M., Sourkounis C., Rogat A., Neumann C. Industrial Electric Grid Evaluation Regarding Harmonics Based on Measurement Data. *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Anacapri, 2016, pp. 282–287. DOI: 10.1109/speedam.2016.7525902
9. Nikolaev A.A., Anokhin V.V. [Controlling the On-Load Tap Changer Control of a Step-Down Transformer Taking Into Account the Operating Parameters of the Electric-Arc Steelmaking Facility]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 61–74. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180308
10. Venikov V.A., Fedorov D.A., Machinsky M.V. [Analysis of the Behavior of the Electrical System during Sudden Changes in Load]. *Electrichestvo [Electricity]*, 1959, no. 4, pp. 16–22. (in Russ.)
11. Zatsarinnaya I.N., Rakhmatullin R.R., Khabibullin M.N., Logacheva A.G. [Operation Features of Overhead Line Relay Protection with Different Element Base]. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 9, pp. 139–145. (in Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2017-9-139-145
12. Zhan L., Bollen M.H.J. Characteristic of Voltage Dips (Sags) in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, vol. 15, no. 2, pp. 827–832. DOI: 10.1109/61.853026
13. Hsu C.-T. Voltage Sags Improvement for the High-Tech Industrial Customers by Using Cogeneration System. *TENCON 2007 – 2007 IEEE Region 10 Conference*, Taipei, 2007, pp. 1–4. DOI: 10.1109/tencon.2007.4428914
14. Pupin V.M., Kuftin D.S., Safonov D.O. [Analysis of Voltage Losses in Supply Grid of Enterprises and Methods of Protection of Electrical Equipment]. *Electrical: Maintenance and Repair*, 2013, no. 4, pp. 40–46. (in Russ.)
15. Kachanov A.N., Kukoba B.L. Estimation of Voltage Dip Influence on Electromechanical Complex Functioning. *News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region*, 2008, no. 2 (12), pp. 22–24. (in Russ.)
16. Goswami A.K., Gupta C.P., Singh G.K. Minimization of Voltage Sag Induced Financial Losses in Distribution Systems Using FACTS Devices. *Electric Power Systems Research*, 2011, 81 (3), pp. 767–774. DOI: 10.1016/j.epsr.2010.11.003
17. Lim P.K., Dorr D.S. Understanding and Resolving Voltage Sag Related Problems for Sensitive Industrial Customers. *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*, Singapore, 2000, vol. 4, pp. 2886–2890. DOI: 10.1109/pesw.2000.847343
18. Fedotov A.I., Mudarisov R.M. [Influence of Voltage Sags at External Short Circuits on Operating Modes of Synchronous Motors]. *Russian Electromechanics*, 2012, no. 3, pp. 71–76. (in Russ.)
19. Shpiganovich A.N., Zatepina V.I., Shilov I.G. [Reactivation of the Energy Supply Upon Short-Term Voltage Dip]. *Industrial Power Engineering*, 2008, no. 10, pp. 15–17. (in Russ.)
20. Khrumshin T.R., Abdulveleev I.R., Kornilov G.P. Electromagnetic Compatibility of High Power STATCOM in Asymmetrical Conditions. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, 2015, pp. 1–6. DOI: 10.1109/sibcon.2015.7146966

21. Khrumshin T.R., Abdulvelev I.R., Kornilov G.P. Assurance of Electromagnetic Compatibility of Powerful Electrotechnical Systems. *Bulletin of the South Ural State University, Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no.1, pp. 82–93. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150110

22. Pyushin P.V. [Relay Protection and Automatics in Active Distribution Grids]. *Electrical Stations*, 2017, no. 9, pp. 29–34. (in Russ.)

Received 18 September 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Корнилов, Г.П. Повышение надежности электроснабжения металлургических агрегатов за счет схемотехнических решений / Г.П. Корнилов, И.Р. Абдулвелеев, А.Ю. Коваленко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 59–69. DOI: 10.14529/power190407

FOR CITATION

Kornilov G.P., Abdulvelev I.R., Kovalenko A.Yu. Improving the Reliability of Steel Producing Units Electric Supply with Schematic Design Solutions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 59–69. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190407
