

ОГРАНИЧЕНИЕ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Объектом исследования является система электроснабжения промышленного предприятия, включающая в себя главную понизительную подстанцию (ГПП), распределительные сети и шины 10 кВ. Проведен анализ провалов напряжения на одной из секций шин при возникновении короткого замыкания. На основе математического моделирования произведено исследование изменения остаточного напряжения при подключении секционного реактора. Разработана математическая модель подстанции в среде *MATLAB* с применением пакета *Simulink*, с помощью которой изучено влияние реактора на значение остаточного напряжения на шинах 10 кВ. Определены и построены зависимости сопротивления реактора от параметров системы – мощности короткого замыкания и сопротивления питающих линий. Предложена методика расчета параметров реактора при наличии двигательной нагрузки на шинах 10 кВ. Рассмотрены возможные способы ограничения отключений двигателей при провалах напряжения. Предложенные технические решения позволят уменьшить количество отключений электроприемников при провалах напряжения питающей сети.

Ключевые слова: провалы напряжения, короткое замыкание, секционный реактор, электроснабжение промышленных предприятий, математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из условий устойчивой работы промышленного предприятия является бесперебойное обеспечение электрической энергией, отвечающей установленным стандартам [1]. Наиболее часто отключение электроприемников происходит при кратковременных провалах напряжения, вызванных однофазными замыканиями в питающих системах 110-220 кВ. Однофазные замыкания на землю в таких системах составляют порядка 60-75% от общих нарушений в системе электроснабжения [2]. Глубина провалов напряжения на шинах 6-10 кВ составляет при этом 20-30%, а их длительность определяется временем действия релейной защиты от замыканий на землю и находится в пределах 0,1-0,3 с [3]. Кратковременные провалы напряжения оказывают наиболее негативные последствия для электроприемников промышленных предприятий с непрерывным технологическим циклом (прокатные станы, травильные линии и т.д.) [4].

Одновременная внезапная остановка технологических комплексов одного или нескольких цехов характеризуется резким и глубоким самосбросом нагрузки [5], который сопровождается продолжительными простоями оборудования, что приводит к значительному экономическому ущербу. Время простоя потребителей электроэнергии в подобной ситуации может достигать нескольких часов.

Неуправляемый процесс разгрузки обусловлен отключением электроприемников от сети в результате: а) реакции современных электронных (микропроцессорных) систем управления на снижение напряжения; б) отпадания реле и контакторов в различных схемах управления электроприводами.

Из анализа статистических данных об аварийных событиях в ОАО «ММК», систематизированных по признаку класса напряжения сети, можно сделать вы-

вод о постепенном снижении их количества (рис. 1). Заметному уменьшению числа нештатных отключений заводских линий электропередачи и силового электрооборудования подстанций способствовало направленное сетевое строительство, осуществленное в рамках обновления основных производственных фондов. Обновленные технологические линии в этих цехах укомплектованы современными автоматизированными агрегатами, электроприемники которых, имея большую единичную мощность, с повышенной чувствительностью реагируют на провалы напряжения в сети. Благодаря этому в распределительных сетях 3-10 кВ число отключений сократилось за 10 лет с 818 (1999 г.) до 591 (2008 г.).

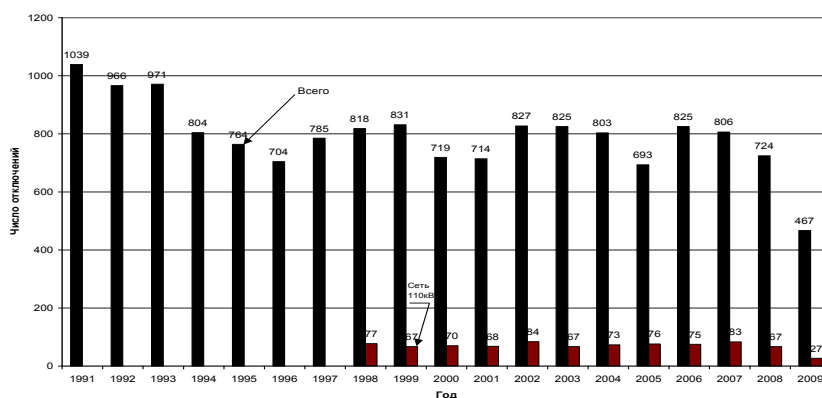


Рис. 1. Число нештатных отключений в сетях 3-220кВ ОАО «ММК»

Существенному снижению рисков нарушения технологического процесса в металлургических цехах с непрерывным производством способствовало также внедрение крупных схмотехнических проектов:

- 1) блочная работа турбогенераторов [6] заводских электростанций совместно с высоковольтными двигателями потребителя;
- 2) разделение сложнзамкнутой сети 110кВ на несвязанные сети с простой конфигурацией.

Вместе с тем, на предприятии разработаны другие технические предложения, которые являются доста-

точно эффективными противоаварийными мерами. Они нацелены на предотвращение избыточных отключений электроприемников ответственных агрегатов в прокатных цехах при кратковременных нарушениях электроснабжения. Место для их приложения определено на цеховых подстанциях и в цепях управления электроприводами конкретных механизмов.

Известно, что высоковольтный двигатель отключится от сети защитой минимального напряжения, если напряжение на его статоре снизится до нуля, хотя и кратковременно. Наименьшая длительность перерыва питания составляет 0,2 с при к.з., локализуемом токовыми отсечками, и 0,5-0,7с – другими токовыми защитами [7]. Успешное, но осуществленное с опозданием действие подстанционной автоматики через 1,5-2 с уже не препятствует отключению электроприемника. Опыт эксплуатации показывает, что типовые схемы АПВ и АВР с выключателями серии ВМГ и ВМП не могут обеспечить высокого быстродействия. Поэтому скольжение нагруженного двигателя мощностью 4000 кВА и более достигает заметного значения, а угол мощности переходит за 90° при длительности бестоковой паузы, превышающей 0,4 с. Машина останавливается после срабатывания устройства АВР, т.к. ее пусковой момент с учетом ресинхронизации имеет недостаточную величину, чтобы успешно завершить процесс самозапуска.

Тот же самый двигатель будет обладать необходимым запасом устойчивости, не допустит качаний и не создаст большие броски тока в сети при восстановлении напряжения, если перерыв в питании будет сокращен до 0,15-0,20 с [8]. Если же напряжение на статоре сохранится во время аварийных переключений в схеме, то условия для нормализации рабочего режима еще более улучшатся.

Действенной мерой, способствующей поддержанию напряжения на питающих шинах в аварийных условиях, заключается в установке на подстанции 3-10 кВ секционного реактора (рис. 2). При такой схеме потребители, подключенные к шинам 3-10 кВ, не будут обесточены в случае потери питания от основного источника – ГПП. Устройство АВР с определенной выдержкой времени включит секционный выключатель, который и зашунтирует реактор.

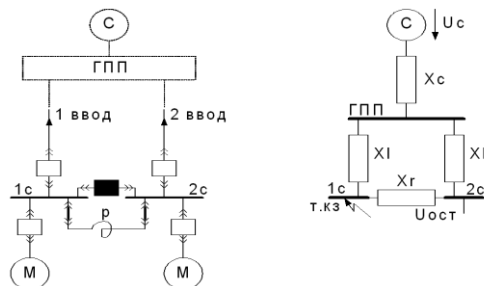


Рис. 2. Принципиальная схема и расчетная схема замещения подстанции с секционным реактором

МЕТОДИКА ПРОВОДИМЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения необходимых рабочих параметров секционного реактора в зависимости от параметров системы и питающей сети использован метод имитационного моделирования в программной среде *Matlab Simulink*. Схема расчетной модели приведена на рис. 3.

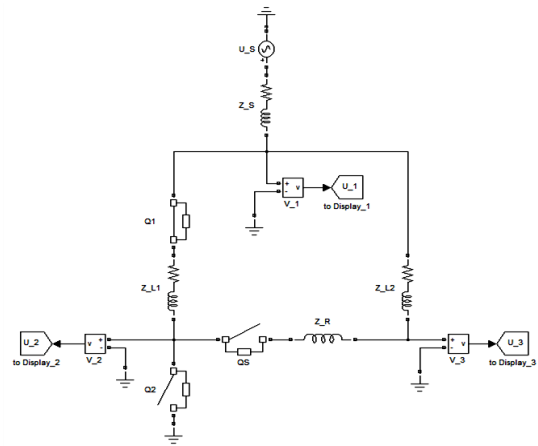


Рис. 3. Схема имитационной модели в *Matlab Simulink*: U_S – напряжение системы, Z_S – сопротивление системы, Z_{L1}, Z_{L2} – сопротивление линий электропередачи, Z_R – сопротивление реактора, $Q1, Q2, QS$ – выключатели

Исследования проводились для следующих начальных условий:

- напряжение системы $U_c=10$ кВ;
- мощность короткого замыкания системы $S_{кз}=100-500$ МВА;
- время срабатывания выключателей $t_{ср}=0,2$ с.

Выключатель $Q2$ производит короткое замыкание на 1-й секции шин 10 кВ, после чего выключатель $Q1$ отключает питающую шины линию 1, а секционный выключатель QS , в свою очередь, подключает 1-ю секцию шин к питающей линии 2 через реактор. На рис. 4 приведены диаграммы изменения остаточного напряжения на шинах 10 кВ при включении резерва для $S_{кз}=100$ МВА и $XL1=XL2=0,1$ Ом.

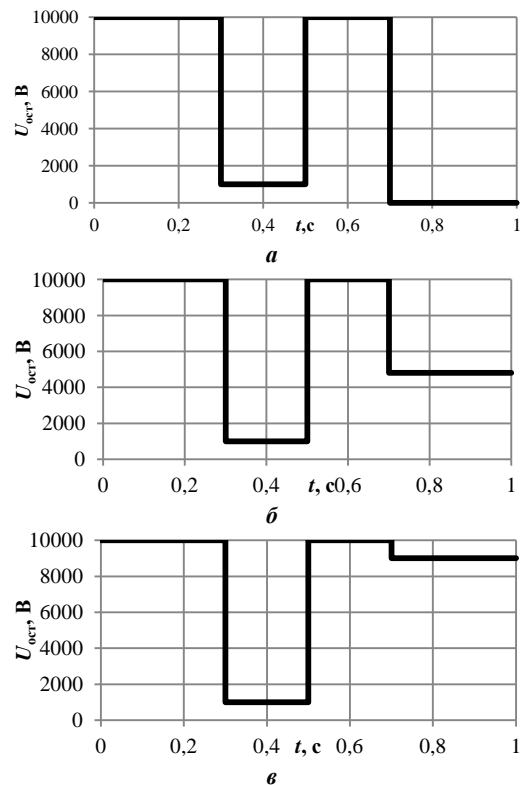


Рис. 4. Диаграмма изменений остаточного напряжения на шинах 10 кВ при вводе резерва: а – без реактора, б – реактор сопротивлением 1 Ом, в – реактор сопротивлением 10 Ом

В результате моделирования получены зависимости сопротивления реактора X_r от сопротивления питающих линий $XL1$ и $XL2$ для различных значений мощности короткого замыкания системы $S_{кз}$ (рис. 5). Согласно существующим нормам электроснабжения промышленных предприятий, уровень остаточного напряжения на резервном вводе должен составлять не менее 0,7 от номинального напряжения при к.з. в сети и не менее 0,9 от номинального в послеаварийном режиме [9]. Таким образом, расчеты параметров секционного реактора производились для двух значений остаточного напряжения $U_{ост}$: $0,7U_{ном}$ и $0,9U_{ном}$.

В случае подключенной к шинам 1-й секции двигательной нагрузки, через реактор к статорной обмотке будет приложено несколько пониженное напряжение от второго ввода подстанции в течение всего времени переключений в схеме

$$U_{c1} = U_{c2} - I_M \cdot x_p, \quad (1)$$

где U_{c1} – напряжение на 1 секции подстанции при отключенном вводе №1; U_{c2} – напряжение на 2 секции подстанции; I_M – ток двигателя; x_p – сопротивление реактора.

Выбор реактора можно осуществить по условию допустимости величины остаточного напряжения на одной из секций подстанции при к.з. на другой секции. Расчетное значение его сопротивления может быть определено решением квадратного уравнения

$$a X_p^2 + b X_p + c = 0, \quad (2)$$

для коэффициентов (a, b, c) которого получены аналитические выражения согласно расчетной схеме замещения сети (см. рис. 2)

$$a = U_{доп} \left(\frac{X_c \cdot X_d''}{2X_{т,л}} + 0,5X_d'' \right) - U_c (0,5X_d'' + X_{т,л}) + (U_{доп} - E_q'') \cdot (X_c + X_{т,л}); \quad (3)$$

$$b = 2U_{доп} \cdot X_c \cdot X_d'' + (1,5U_{доп} - U_c) \cdot X_{т,л} \cdot X_d'' + (U_{доп} - E_q'') \cdot (X_{т,л} + 2X_c) \cdot X_{т,л}; \quad (4)$$

$$c = U_{доп} \cdot X_{т,л} \cdot X_d'' \cdot (X_{т,л} + 2X_c), \quad (5)$$

где $U_{доп}$ – допустимая величина остаточного напряжения на шинах 2 с. подстанции при к.з. на шинах 1 с.; U_c – напряжение системного источника питания; E_q'' – сверхпереходная ЭДС синхронного двигателя; X_c – сопротивление системного источника питания; $X_{т,л}$ – сопротивление трансформатора ГПП и ЛЭП, соединяющей подстанцию с ГПП; X_d'' – сверхпереходное сопротивление синхронного двигателя.

Распространенной причиной внезапного нарушения непрерывного технологического процесса в цехах промышленных предприятий является отключение низковольтных двигателей, управляемых магнитным пускателем (контактором) с защитой от минимального напряжения, вспомогательных механизмов (рольганги, кантователи, ножницы, пилы, маслонасосы и др.). При

кратковременных провалах напряжения и отключении вспомогательных механизмов происходит аварийный останов главного привода. Восстановление технологического процесса занимает, как правило, несколько часов с большими экономическими потерями.

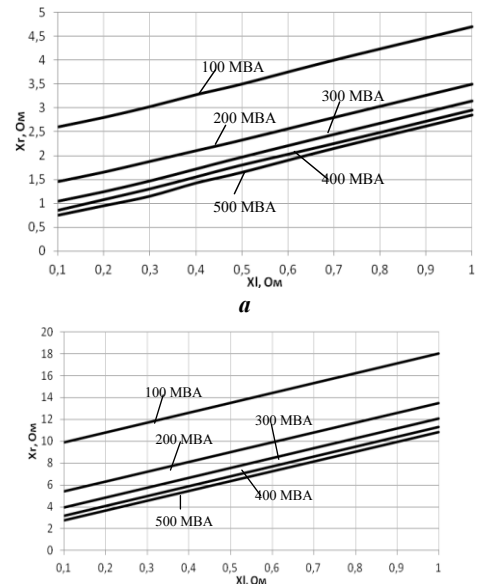


Рис. 5. Зависимости сопротивления реактора от параметров питающих линий: а – для $U_{ост}=0,7U_{ном}$; б – для $U_{ост}=0,9U_{ном}$

Чтобы снизить вероятность нештатного развития аварийной ситуации при управлении непрерывного технологического процесса, следует предусмотреть возможность самозапуска для низковольтных двигателей. Простой способ его обеспечения состоит в задержке отпадания якоря магнитного пускателя при кратковременных и глубоких провалах напряжения питающей сети (рис. 6 и 7). В первой схеме используется реле времени постоянного тока, контакты которого с задержкой времени при возврате, введены в цепь последовательно с катушкой пускателя. Согласно второй схеме магнитный пускатель остается включенным при провале напряжения, за счет энергии, запасенной в конденсаторе.

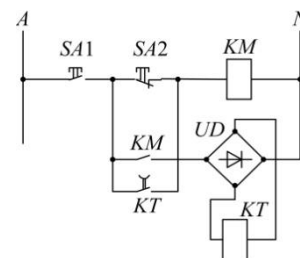


Рис. 6. Устройство задержки времени на отпусkanie магнитного пускателя KM с помощью реле времени

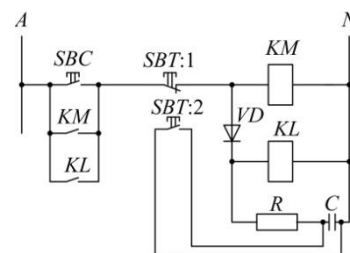


Рис. 7. Устройство задержки времени на отпусkanie магнитного пускателя KM с помощью конденсатора

Простота конструкции и надежность в работе являются отличительной чертой предложенных решений по сравнению с типовыми схемами задержки, которые были реализованы ранее [10].

Следует отметить, что магнитный пускатель используется в качестве коммутационного аппарата для многочисленных электроприемников. Однако только некоторым из них требуется организация самозапуска. Поэтому комплектация пускателей устройствами задержки отпадания якоря проводится адресно, с учетом ответственности механизмов в осуществлении производственного процесса. Например, наблюдения показывают, что к остановке прокатного стана приводят отключения следующих агрегатов:

- зарядное устройство аккумуляторной батареи подстанции – источник оперативного тока для катушек включения и отключения, цепей защиты и управления высоковольтных выключателей;
- резервный возбудитель синхронного двигателя главного привода стана;
- двигатели маслонасосов, предназначенные для подачи масла в подшипники валков черновых и чистовых клетей; насосов высокого давления для сбива окалины и др.

В первую очередь перечисленные приемники должны иметь контакторы и пускатели с временной задержкой на отключение при провалах напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Обеспечение устойчивой работы ответственных электроприемников предприятий непрерывного технологического производства (прокатные станы, травильные линии и т.д.) требует бесперебойного электроснабжения с необходимым уровнем остаточного напряжения. Поставленная задача решается в производственных условиях на нескольких уровнях и различными способами, в том числе:

- построение рациональной системы электроснабжения с достаточной степенью резервирования питающих линий;
- установка межсекционных реакторов с необходимой величиной индуктивности;
- применение дополнительных устройств, обеспечи-

вающих задержку времени на отпусkanie магнитных пускателей вспомогательных механизмов.

2. На основе проведенных расчетов сформулированы необходимые рекомендации для выбора конкретных мероприятий по ограничению последствий провалов напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 54149-2010. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва, 2012.
2. Системы бесперебойного электропитания особо ответственных потребителей с частотно-регулируемым электроприводом / В.В. Ровнейко, Р.Р. Галлямов, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, В.Б. Славгородский // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 4. С. 51-53.
3. Проблемы качества внутриводского электроснабжения и их решение на примере ОАО «ММК» / Ю.П. Журавлев, А.Ю. Коваленко, Г.П. Корнилов, В.Б. Славгородский, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 4. С. 26-30.
4. Корнилов Г.П., Федоров А.А. О качестве электроэнергии и ее эффективном использовании // Промышленная энергетика. 1978. № 11. С. 27-29.
5. Средства и перспективы управления реактивной мощностью крупного металлургического предприятия / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, А.Ю. Коваленко, Е.А. Кузнецов // Электротехника. 2008. № 5. С. 25-32.
6. Фёдоров А.А., Корнилов Г.П. О применении компенсирующих устройств в системах электроснабжения с мощными нелинейными нагрузками // Электричество. 1980. № 7. С. 64.
7. Глебов И.А., Шулаков Н.В., Крутиков Е.А. Проблемы пуска сверхмощных синхронных машин. М.: Наука, 1988.
8. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных двигателей. М.: Энергия, 1977. 216 с.
9. Абдуллазянов Э.Ю., Забелкин Б.А. Ограничение провалов напряжения в системах промышленного электроснабжения // Промышленная энергетика. 2009. №8. С 18-20.
10. Корнилов Г.П., Шеметов А.Н., Журавлев Ю.Л. Разработка системы управления реактивной мощностью прокатного стана 2000 ОАО «ММК» // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2010. № 10. С. 27-32.

INFORMATION IN ENGLISH

LIMITATION OF VOLTAGE DROPS IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF ENTERPRISES

Kornilov G.P., Kovalenko A.Yu., Nikolaev A.A., Abdulvelev I.R., Khrumshin T.R.

The object of the study is the power supply system of the industrial enterprise, which includes the main step-down substation, distribution networks and 10 kV bus. The analysis of voltage dips on one section of the tire was carried out when a fault occurred. On the basis of mathematical modeling the study obtained the resulting voltage produced change when the sectional reactor was connected. The mathematical model of the substation was developed in MATLAB using Simulink package, which facilitated the study of the effect of the reactor application on the value of the resulting voltage in the 10 kV bus. The research group defined and developed the relationships between the reactor resistance and system parameters such as short-circuit power and resistance of supply lines. A method for calculating the parameters of the reactor in the presence of motor load in 10 kV buses was offered. The possible ways limiting the engine shut

down during voltage drops were considered. The proposed technical solutions will reduce the number of shutdowns of power consumers during voltage drops in the power supply lines.

Keywords: voltage dips, short circuit, sectional reactor, power supply of industrial enterprises, mathematical modeling.

REFERENCES

1. GOST R 54149-2010. Quality standards of electrical energy in power systems of general purpose. Moscow, 2012.
2. Rovneyko V.V., Gallyamov R.R., Kornilov G.P., Khrumshin T.R., Slavgorodsky V.B. Sistemy bospereboinogo elektropitaniya osobo otvetstvennykh potrebitelei s chastotno-reguliruемым электроприводом [Uninterruptible power system of critical power consumers with adjustable-frequency electric

drive]. *Izvestiya vuzov. Elektromehnika* [News of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 51-53.

3. Zhuravlev Y.P., Kovalenko A.Y., Kornilov G.P., Slavgorodsky V.B., Nikolaev A.A., Khramshin T.R. Problemy kachestva vnytrizavodskogo elektrosnabzheniya i ih reshenie na primere OAO «ММК» [Quality problems of interplant power supply and their solution at the OJSC «ММК»]. *Izvestiya vuzov. Elektromehnika* [News of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 26-30.

4. Kornilov G.P., Fedorov A.A. O kachestve elektroenergii i ee effektivnom ispolzovanii [About the quality of electricity and its efficient use]. *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering], 1978, no. 11, pp. 27-29.

5. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Kovalenko A.Y., Kuznetsov E.A. Sredstva i perspektivy upravleniya reaktivnoy mosvhnostyu krupnogo metallurgicheskogo predpriyatiya [Means and trends of reactive power control at large ironworks] / G.P. Kornilov, // *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2008, no. 5, pp. 25-32.

6. Fedorov A.A., Kornilov G.P. O primeneniі kompensiruyuschikh ustroystv s moschnymi nelineynymi

nagruzkami [Application of compensating devices in power systems with powerful non-linear loads]. *Elektichestvo* [Electricity], 1980, no. 7, p. 64.

7. Glebov I.A., Shulakov N.V., Krutikov E.A. *Problemy puskа sverhmoschnykh sinhronnykh mashin* [Starting problems of heavy duty synchronous machines]. Moscow: Nauka, 1988.

8. Slodarch M.I. *Rezhimy raboty, releinaya zaschita i avtomatika sinhronnykh dvigatelei* [Operating modes, relay protection and automation of synchronous motors]. Moscow: Energiya, 1977.

9. Abdullazyanov E.Y., Zabelkin B.A. Ogranichenie provalov napryazheniya v sistemah promyshlennogo elektrosnabzheniya [Limitation of voltage dips in power supply systems of enterprises]. *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2009, no. 8, pp. 18-20.

10. Kornilov G.P., Shemetov A.N., Zhuravlev Y.P. Razrabotka sistemy upravleniya reaktivnoi moschnostyu prokatnogo stana 2000 OAO «ММК» [Development of reactive power control system for rolling-mill 2000 of OJSC «ММК»]. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: maintenance and repair], 2010, no. 10, pp. 27-32.

УДК 621.315.1

Газизова О.В., Абдулхаликова А.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПИТАЮЩИХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ КРУПНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УЗЛА

В настоящий момент повышаются мощности, потребляемые крупными промышленными предприятиями, как следствие, требуется увеличение пропускной способности воздушных линий электропередачи. Для оценки пропускной способности расчет проводился с распределенными параметрами линии с применением волновых уравнений. Для сравнения также был произведен расчет с сосредоточенными параметрами линии по П-образной схеме замещения. Полученные результаты позволили сделать выводы о достаточной пропускной способности питающих линий Магнитогорского энергетического узла.

Ключевые слова: питающая линия, энергетический узел, статическая устойчивость, сеть, линия электропередачи, пропускная способность, коэффициент запаса, предел передаваемой мощности.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из современных тенденций металлургической промышленности России является усовершенствование технологических переделов производства и, как следствие, повышение энергоемкости потребителей электрической энергии. С одной стороны, это приводит к расширению собственной энергетической базы предприятий, с другой – к повышению пропускной способности и числа линий связи с энергосистемой. Характерным промышленным потребителем в данной группе предприятий является Магнитогорский металлургический комбинат, получающий питание от Магнитогорского энергетического узла. Поскольку в процессе эксплуатации число питающих линий может меняться, то исследование их пропускной способности представляет собой актуальную задачу.

Вопросам исследования устойчивости Магнитогорского промышленного энергоузла, имеющего сложнзамкнутую конфигурацию, линии электропередачи низкого и высокого напряжений, а также собственные источники электроэнергии посвящено большое количество работ, в том числе [1, 2]. Однако данные работы охватывают статическую и динамическую устойчивость машин переменного тока, прежде всего синхронных генераторов, и не дают характеристику статической устойчивости питающих линий. Поэтому

работа посвящена исследованию данных вопросов.

Методы, используемые при анализе статической устойчивости линий электропередачи высоких напряжений, изложены в работах [4, 5]. Они позволяют достаточно полно произвести анализ пропускной способности ЛЭП с учетом распределенности параметров схемы замещения.

В табл. 1 представлен перечень питающих линий Магнитогорского энергетического узла с указанием напряжения, длины, марки и сечения провода.

МЕТОДИКИ

Как известно, при исследовании пропускной способности протяженных высоковольтных линий является необходимость учета распределенности параметров схемы замещения. Одновременно встает вопрос о длинах и напряжениях линий, которые могут быть исследованы упрощено, без учета распределенности. Магнитогорский энергетический узел питается от сравнительно протяженных линий высокого напряжения, тогда как питающие линии в составе колец 110 и 220 кВ имеют небольшую длину.

В ходе работы для питающих линий электропередачи Магнитогорского энергетического узла 110-500 кВ были произведены расчеты режимов и определены предельные передаваемые активные мощности тремя