

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 primeneni 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 pusk 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

способами: с учетом распределенности линий, без учета распределенности и представлении линий в виде П-образной схемы замещения, разбиением линии на определенное число участков с последующим расчетом режима каждого без учета распределенности.

Таблица 1
Питающие линии Магнитогорского энергоузла

Название линии	U, кВ	Марка и сечение провода	Длина, км
Магнитогорская – 77	220	АСО-500	30
Магнитогорская – Ириклинская ГРЭС	500	АС-300	221
Магнитогорская – Троицкая ГРЭС	500	АС-300	187
ПС30 – ПС23	110	АС-300	2
ПС30 – ПС87	110	АС-300	4
ПС60 – ЦЭС	110	АС-300	8
ПС77 – ТЭЦ	110	АСУ-300	3
ПС85 – ЦЭС	110	АС-300	3
ПС96 – ЦЭС	110	АС-300	2
Смеловская – 30	220	АСО-500	17
Смеловская – Бекетово	500	АС-300	272
Смеловская – Ирмель	220	АСО-500	120
Смеловская – Магнитогорская	500	АС-300	16
Смеловская – Магнитогорская	220	АСО-300	19
Троицкая ГРЭС – 90	220	АСО-480	177
ТЭЦ – ЦЭС	110	АС-300	2

Как показали расчеты, подход с разбиением линии на ряд менее длинных с целью избегания учета распределенности, сложно применим. Это связано с тем, что для получения удовлетворительных результатов необходимо линию порядка 100 км разбивать на большое количество участков (около 100) и исследовать каждый в виде П-образной схемы замещения. Это также показано в работе [5].

С целью учета распределенности параметров протяженная высоковольтная линия электропередачи была представлена в виде четырехполюсника, у которого входными и выходными параметрами являются ток и напряжение в начале и конце исследуемой линии. Связь между параметрами начала и конца линии четырехполюсника описывается уравнениями согласно [6]:

$$U_1 = AU_2 + BI_2; \quad (1)$$

$$I_1 = CU_2 + DI_2. \quad (2)$$

После преобразований, приведенных в [6], уравнения (1), (2) можно записать через вторичные параметры:

$$U_1 = U_2 \operatorname{ch} \gamma + I_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma; \quad (3)$$

$$I_1 = U_2 \frac{1}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma + I_2 \operatorname{ch} \gamma, \quad (4)$$

где U_1, U_2, I_1, I_2 – напряжения и токи в начале и конце линии соответственно; Z_c – волновое сопротивление линии.

$$\gamma = \ln \frac{U_1}{U_2} + j\beta = \alpha + j\beta, \quad (5)$$

где β – сдвиг по фазе напряжений начала и конца линии.

При расчете режимов ЛЭП по П-образной схеме замещения был определен зарядный ток в начале линии, сопротивление линии, ток в линии. Затем было найдено падение напряжения на линии, напряжение в начале линии, зарядный ток линии в начале линии и суммарный ток в начале ЛЭП, то есть был произведен расчет линии по току нагрузки по параметрам конца линии.

Ниже приведены таблицы с результатами расчетов по волновому уравнению и П-образной схеме замещения с натуральным током и предельно допустимым током провода. В табл. 2 приведены параметры исследуемых линий электропередачи, токи в начале и конце линии I_1 и I_2 , расчетные коэффициенты, напряжение в начале линии U_1 , потеря напряжения ΔU , а также коэффициент запаса устойчивости k_3 .

Коэффициент запаса статической устойчивости линии электропередачи определяется согласно Методическим указаниям по устойчивости энергосистем (Приказ Минэнерго России от 30.06.2003 №277). В качестве нагрузочных токов линий ввиду отсутствия информации были приняты длительно допустимые токи. Согласно полученным результатам наилучшей устойчивостью обладает линия, соединяющая Троицкую ГРЭС и подстанцию (ПС) №90 Магнитогорского энергетического узла. Высокий запас устойчивости ряда линий объясняется их очень небольшой протяженностью. В целом, исследуемая сеть обладает достаточным запасом статической устойчивости.

Кроме того, был произведен расчет режимов данных линий с использованием П-образной схемы замещения по параметрам конца ЛЭП. В табл. 3 приведены расчеты режимов при условии равенства тока в конце линии длительно допустимому.

Допустимость подходов оценивалась путем сравнения потерь напряжения при расчете выбранными методами при условии равенства тока в конце линии длительно допустимому току исследуемого провода.

Как видно из расчетов, неучет распределенности параметров схемы замещения приводит к погрешностям при расчете высоковольтных протяженных линий электропередачи свыше 10 км. Однако если в целом на расчет режима при таких длинах существенного влияния не будет, то при длинах свыше 100 км при напряжении 110 кВ погрешность будет недопустимой.

Результаты расчета с применением волновых сопротивлений

Название	U, кВ	Марка и сечение провода	L, км	r ₀ , Ом/км	x ₀ , Ом/км	b ₀ , См/км	g ₀ , См/км	Волновое сопротивление Z _c , Ом	I ₂ , кА	
Смеловская – Бекетово (Абзелиловский р-н)	500	3хАС-330	272	0,029	0,308	3,62·10 ⁻⁶	3,2·10 ⁻⁸	292,328	1,71	
Смеловская – Магнитогорская	500	3хАС-330	16,4	0,029	0,308	3,62·10 ⁻⁶	3,2·10 ⁻⁸	292,328	1,71	
Магнитогорская – Ириклинская ГРЭС	500	3хАС-330	220	0,029	0,308	3,62·10 ⁻⁶	3,2·10 ⁻⁸	292,328	1,71	
Магнитогорская – Троицкая ГРЭС	500	3хАСО-330	186,6	0,029	0,308	3,62·10 ⁻⁶	3,2·10 ⁻⁸	292,328	1,71	
Троицкая ГРЭС – Шагол	500	3хАСО-330	149,4	0,029	0,308	3,62·10 ⁻⁶	3,2·10 ⁻⁸	292,328	1,71	
Троицкая ГРЭС – Сокол	500	3хАСО-330	164	0,029	0,308	3,62·10 ⁻⁶	3,2·10 ⁻⁸	292,328	1,71	
Смеловская – Ирмель (БЭ)	220	АСО-500	120	0,06	0,413	2,74·10 ⁻⁶	3,1·10 ⁻⁸	390,26	0,564	
Магнитогорская – ПС 77	220	АСО-500	30,2	0,06	0,413	2,74·10 ⁻⁶	3,1·10 ⁻⁸	390,26	0,564	
Смеловская – Магнитогорская	220	АСО-300	19	0,098	0,429	2,64·10 ⁻⁶	5,165·10 ⁻⁸	408,233	0,539	
Троицкая ГРЭС – ПС 90	220	АСО-480	177	0,06	0,413	2,74·10 ⁻⁶	3,1·10 ⁻⁸	390,26	0,564	
ПС 77 – ТЭЦ	110	АСУ-300	3	0,098	0,429	2,64·10 ⁻⁶	2,066·10 ⁻⁷	407,649	0,27	
ПС 30 – ПС 87	110	АС-300	4,33	0,098	0,429	2,64·10 ⁻⁶	2,066·10 ⁻⁷	407,649	0,27	
ПС30 – ПС23	110	АС-300	2,29	0,098	0,429	2,64·10 ⁻⁶	2,066·10 ⁻⁷	407,649	0,27	
ПС96 – ЦЭС	110	АС-300	2,2	0,098	0,429	2,64·10 ⁻⁶	2,066·10 ⁻⁷	407,649	0,27	
ПС60 – ЦЭС	110	АС-300	8,2	0,098	0,429	2,64·10 ⁻⁶	2,066·10 ⁻⁷	407,649	0,27	
ПС85 – ЦЭС	110	АС-300	2,6	0,098	0,429	2,64·10 ⁻⁶	2,066·10 ⁻⁷	407,649	0,27	
ТЭЦ – ЦЭС	110	АС-300	2,2	0,098	0,429	2,64·10 ⁻⁶	2,066·10 ⁻⁷	407,649	0,27	
Название	β	α	chy		shy		U ₁ , кВ	I ₁ , кА	ΔU, кВ	k ₃ , %
Смеловская – Бекетово (Абзелиловский р-н)	1,056·10 ⁻³	0,05·10 ⁻³	0,96+3,99i·10 ⁻³		0,013+0,285i		507	1,7	7,0	493
Смеловская – Магнитогорская	1,056·10 ⁻³	0,05·10 ⁻³	1,+1,394i·10 ⁻⁵		8,199·10 ⁻⁴ +0,017i		500	1,7	0,4	9847
Магнитогорская – Ириклинская ГРЭС	1,056·10 ⁻³	0,05·10 ⁻³	0,973+2,551i·10 ⁻³		0,011+0,232i		505	1,7	5,5	629
Магнитогорская – Троицкая ГРЭС	1,056·10 ⁻³	0,05·10 ⁻³	0,98+1,838i·10 ⁻³		9,115·10 ⁻³ +0,198i		504	1,7	4,6	755
Троицкая ГРЭС – Шагол	1,056·10 ⁻³	0,05·10 ⁻³	0,987+1,179i·10 ⁻³		7,355·10 ⁻³ +0,158i		503	1,7	3,7	967
Троицкая ГРЭС – Сокол	1,056·10 ⁻³	0,05·10 ⁻³	0,985+1,424i·10 ⁻³		8,056·10 ⁻³ +0,174i		504	1,7	4,1	871
Смеловская – Ирмель (БЭ)	1,064·10 ⁻³	0,077·10 ⁻³	0,992+1,185i·10 ⁻³		9,204·10 ⁻³ +0,128i		222	0,6	2,0	237
Магнитогорская – ПС 77	1,064·10 ⁻³	0,077·10 ⁻³	0,999+7,48i·10 ⁻⁵		2,337·10 ⁻³ +0,032i		220	0,6	0,5	1246
Смеловская – Магнитогорская	1,064·10 ⁻³	0,122·10 ⁻³	1+4,606i·10 ⁻⁵		2,303·10 ⁻³ +0,02i		220	0,5	0,5	26390
Троицкая ГРЭС – ПС 90	1,064·10 ⁻³	0,077·10 ⁻³	0,982+2,617i·10 ⁻³		0,014+0,187i		223	0,3	3,1	130
ПС 77 – ТЭЦ	1,064·10 ⁻³	0,122·10 ⁻³	1+5,56i·10 ⁻⁷		3,663·10 ⁻⁴ +41,518i·10 ⁻³		110	0,3	0,04	18770
ПС 30 – ПС 87	1,064·10 ⁻³	0,122·10 ⁻³	1+2,446i·10 ⁻⁶		5,233·10 ⁻⁴ +4,675i·10 ⁻³		110	0,3	0,06	5767
ПС30 – ПС23	1,064·10 ⁻³	0,122·10 ⁻³	1+6,816i·10 ⁻⁷		2,791·10 ⁻⁴ +2,442i·10 ⁻³		110	0,3	0,04	11130
ПС96 – ЦЭС	1,064·10 ⁻³	0,122·10 ⁻³	1+6,119i·10 ⁻⁷		2,617·10 ⁻⁴ +2,338·10 ⁻³		110	0,3	0,03	109300
ПС60 – ЦЭС	1,064·10 ⁻³	0,122·10 ⁻³	1+8,672i·10 ⁻⁶		9,943·10 ⁻⁴ +8,722·10 ⁻³		110	0,3	0,11	3183
ПС85 – ЦЭС	1,064·10 ⁻³	0,122·10 ⁻³	1+8,71i·10 ⁻⁷		3,14·10 ⁻⁴ +2,774·10 ⁻³		110	0,3	0,04	10220
ТЭЦ – ЦЭС	1,064·10 ⁻³	0,122·10 ⁻³	1,032+2,865i·10 ⁻⁴		0,257+1,152·10 ⁻⁴		110	0,3	0,03	109300

Расчеты режимов при использовании П-образной схемы замещения

Название	I_{c2}, A	$Z_l, \text{Ом}$	$I_{\text{дл.доп}}, A$	$\Delta U, B$	$U_1, \text{кВ}$	I_{c1}, A	I_1, A
Смеловская – Бекетово (Абзелюловский р-н)	0,246i	84,1	730	61427	561	275	781
Смеловская – Магнитогорская	0,015i	5,1	730	3704	503	15	730
Магнитогорская – Ириклинская ГРЭС	0,199i	68,1	730	49680	549	219	762
Магнитогорская – Троицкая ГРЭС	0,169i	57,7	730	42140	542	183	752
Троицкая ГРЭС – Шагол	0,135i	46,219	730	33790	533	144	744
Троицкая ГРЭС – Сокол	0,148i	50,8	730	37036	537	159	747
Смеловская – Ирмель (БЭ)	0,036i	50,1	945	47325	267	44	946
Магнитогорская – ПС 77	$9,102i \cdot 10^{-3}$	12,6	945	11910	231,91	10	945
Смеловская – Магнитогорская	$5,518i \cdot 10^{-3}$	8,4	710	5936	225	6	710
Троицкая ГРЭС – ПС 90	0,053i	73,9	945	69805	289	70	947
ПС 77 – ТЭЦ	$4,356i \cdot 10^{-4}$	1,32	710	937	110	0,44	710
ПС 30 – ПС 87	$6,287i \cdot 10^{-4}$	2	710	1353	111	0,64	710
ПС30 – ПС23	$3,325i \cdot 10^{-4}$	1	710	715,5	110	0,34	710
ПС96 – ЦЭС	$3,194i \cdot 10^{-4}$	1	710	687,4	110	0,32	710
ПС60 – ЦЭС	$1,191i \cdot 10^{-3}$	3,6	710	2562	112	1,22	710
ПС85 – ЦЭС	$3,775i \cdot 10^{-4}$	1,1	710	812,3	110	0,38	710
ТЭЦ – ЦЭС	$3,194i \cdot 10^{-4}$	1	710	687,4	110	0,32	710

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показало исследование, учет распределенности параметров схемы замещения высоковольтной линии электропередачи при любой длине улучшает точность получаемых параметров режима. Однако, если линии длиной 10-20 км представляется возможным учитывать П-образной схемой замещения с сосредоточенными параметрами, то производить расчеты режимов линий большей длины следует с учетом распределенности параметров. Разбиение длинной линии на ряд коротких с последующим представлением каждой из них в виде П-образной схемы замещения нецелесообразно, так как существенно возрастает число вычислительных операций и увеличивается время счета.

Применительно к Магнитогорскому энергетическому узлу расчеты показали, что его питающие линии 110 кВ и выше обладают достаточной пропускной способностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ переходных процессов в системах электро-

снабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями в режимах выхода на раздельную работу после короткого замыкания / Б.И. Заславец, В.А. Игуменцев, Н.А. Николаев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. № 1. С. 60-65.

2. Представление машин переменного тока в расчетах динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / Б.И. Заславец, В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2008. №11(111). С. 3-8.

3. Александров Г.Н. Передача электрической энергии. 2-е изд. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 412 с.

4. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. М.: Энергия, 1979. 456 с.

5. Аррилага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.

6. Ананичева С.С., Бартоломей П.И., Мызин А.Л. Передача электроэнергии на дальние расстояния: учеб. пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1993. 80 с.

INFORMATION IN ENGLISH

TRANSMISSION CAPACITY RESEARCH OF FEED POWER LINES OF LARGE INDUSTRIAL POWER UNIT

Gazizova O.V., Abdulhalikova A.A.

At the moment the capacities consumed by large industrial enterprises increase, as a result the increase in transmission capacity of overhead power transmission lines is required. To assess the transmission capacity calculation was carried out with the distributed parameters of the line with application of the wave equations. In contrast, the calculation with the concentrated parameters of the line on a P-shaped equivalent circuit was made. The received results made it possible to draw conclusions on the sufficient capacity of feeding lines of Magnitogorsk power supply unit.

Keywords: supply line, power supply unit, static stability,

network, power line, transmission capacity, reserve coefficient, transmission limit.

REFERENCES

1. Zaslavets B.I., Igumenshev V.A., Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Analiz perehodnyh protsessov v sistemah elektrosnabzheniya promyshlennyh predpriyatii s sobstvennymi elektrostantsiyami v rezhimakh vykhoda na razdelnyuyu raboty posle korotkogo zamykaniya [Analysis of transient processes in systems of power supply of industrial enterprises possessing their own power plants in modes of separate operation after short circuit]. *Izvestiya*

vuzov. *Elektromehanika* [News of higher educational institutions. Electromechanics], 2009, no. 1, pp. 60-65.

2. Zaslavets B.I., Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Predstavlenie mashin peremennogo toka v raschetah dinamicheskoi ustoychivosti sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii s sobstvennymi elektrostantsiyami [Alternating current machines in calculations of dynamic stability of power supply systems at industrial enterprises possessing their own power plants]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the Southern Ural state university. Series: Power Engineering], 2008, no. 11(111), pp. 3-8.

3. Alexandrov G.N. *Peredacha elektricheskoi energii* [Elec-

tric energy transmission]. 2nd edition, Saint-Petersburg: Publishing house of Polytechnical University, 2009. 412 p.

4. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti elektricheskikh sistem* [Issues of electrical systems stability]. Moscow: Energy, 1979. 456 p.

5. Arrillaga J., Bradley D., Bodzher P. *Garmoniki v elektricheskikh sistemah* [Harmonics in electrical systems]. Translated from English. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 320 p.

6. Ananicheva S.S., Bartolomey P.I., Myzin A.L. *Peredacha elektroenergii na dalnie rasstoyaniya* [Long distance electric power transmission]. Textbook. Yekaterinburg: UGTU-UI, 1993. 80 p.