

接有冲击性负荷的微电网电能质量分析

管伟翔¹, 钱君霞², 王 亮², 张海龙¹, 王思荣¹

(1.南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210023)

(2.江苏科能电力工程咨询有限公司, 江苏 南京 211102)

[摘要] 微电网通过连接分布式电源与大电网,可有效降低分布式发电对电网的冲击,提高供电可靠性。但由于微电网网架相对脆弱,随着冲击性负荷的大量接入,电网谐波、电压不平衡等因素对微电网电能质量影响越来越明显。建立了风光储交流微电网并网系统,并以炼钢电弧炉作为典型冲击性负荷模型,重点分析了弧长变化较大的熔化期对微电网造成的三相不平衡、电压波动、谐波等电能质量问题。结果表明,冲击性负荷接入对并网方式下的微电网系统电能质量有很大影响。

[关键词] 风光储交流微电网,炼钢电弧炉,冲击性负荷,电能质量

[中图分类号] TM711 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2019)04-0032-06

Power Quality Analysis of Microgrid with Impact Load

Guan Weixiang¹, Qian Junxia², Wang Liang², Zhang Hailong¹, Wang Enrong¹

(1.School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.Jiangsu Keneng Power Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The microgrid can effectively reduce the impact of distributed power generation on the power grid and improve the reliability of power supply by connecting the distributed power source and the large power grid. However, because of the relatively fragile grid and the massive access of the impact load, the factors such as voltage imbalance and the grid harmonics have become more and more obvious for the impact of the microgrid power quality. The grid-connected system of AC microgrid with wind-light storage is established, and the steel-making electric arc furnace is used as the typical impact load model. The three-phase unbalance, voltage fluctuation and harmonic caused by the melting period of the arc length change are analyzed mainly in the paper. The results show that the impact load access has a great impact on the power quality of the microgrid system under the grid connection mode.

Key words: the AC microgrid with wind-light storage, the steel-making electric arc furnace, the impact load, power quality

太阳能、风能资源丰富,清洁无污染,利用其发电具有广阔的发展前景。微电网作为大电网的有效补充,可以把新能源与新能源发电有效整合,提高分布式电源的发电性能及电网的供电可靠性,具有良好的经济和社会价值^[1]。然而由于光照、风速的间接性和随机性,光伏和风力发电机组直接接入电网时往往会带来电能质量问题,影响电网供电的稳定性^[2-3]。

目前,国内外学者针对微电网的研究大多数集中在光伏、风力发电机等分布式发电系统接入对微电网稳定性的影响、分布式电源的控制策略及微电网规划上,对接入微电网系统的非线性、冲击性负荷及其带来的电能质量问题研究相对较少。文献[4]通过分析风力发电并网引发的电压波动与闪变、谐波及电压偏差的机理,发现电能质量问题是由电力电子换能装置和功率传递引起的,并提出了一种电压偏差测量方法。文献[5]建立了完整的三相光伏并网发电系统仿真模型,重点研究电压偏差、节点电压谐波和电流谐波等电能质量问题,并设计了基于 STATCOM 的混合无功补偿器。文献[6]通过建立基于实测数据的冲击性负荷模型,针对其接入供电系统时引发的电能质量问题提出了新的评估标准,发现由冲击性负荷引起的供电系统电能质量问题不容忽视。文献[7]建立了风机、光伏和微型燃气轮机组成的交流微电网和直流微

电网模型,从汽车充电站分别接入交流微电网和直流微电网的角度,对比分析了不同接入方式下汽车充电站对电网产生的影响。

本文拟开展冲击性负荷对微电网并网运行时的电能质量问题研究,首先建立风光储微电网并网供电系统,接着引入交流电弧炉机理模型,建立冲击性负荷接入微电网仿真平台,最后详细分析电弧炉不同运行工况引发的电能质量问题。

1 带有冲击性负荷的微电网并网系统

微电网是一种将分布式电源、负荷、储能装置、变流器以及监控保护装置相结合的小型发电系统,既可并网运行,也可离网运行^[8]。本文的微电网采用并网运行模式,分布式电源包含光伏和风力发电机,储能装置采用综合性能较好的蓄电池组,负荷则选取对电能质量影响较大的冲击性负荷,系统结构如图1所示。

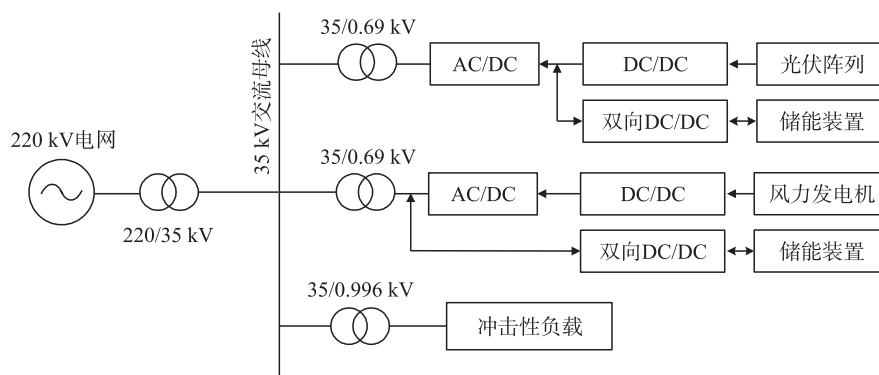


图1 带有冲击性负荷的微电网并网系统结构图

Fig. 1 Structural chart of microgrid grid connecting system with impulsive load

1.1 光伏

光伏发电系统是由光伏阵列、Boost升压变流器、DC/AC逆变器、LC滤波器、隔离变压器和电网共同组成,其并网系统结构如图2所示。

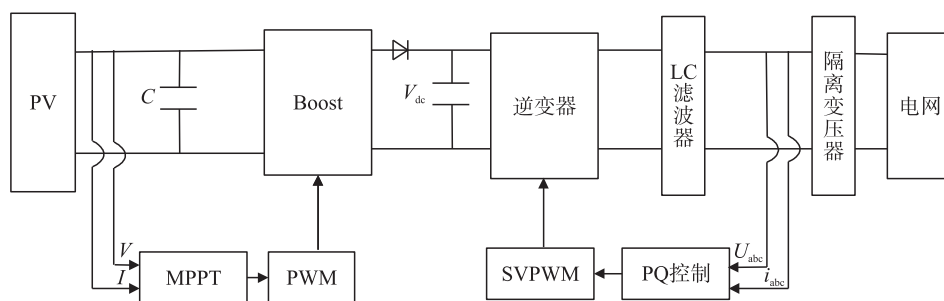


图2 光伏并网系统结构图

Fig. 2 Photovoltaic grid-connected system structure

由于光伏阵列发电功率与外界环境因素密切相关,为了提高光/电转化率,需对光伏电池进行最大功率点跟踪,Boost电路保证光伏阵列的最大功率输出。光伏电池输出的直流电需进行逆变环节将其转化为交流电并入电网,逆变器的并网控制方式采用分布式电源常见的恒功率控制。隔离变压器和LC滤波器则是为了隔离直流、抑制三次及其整数倍谐波的产生。

1.2 风力发电机

本文采用转子侧能量可双向流动的双馈风力发电系统。双馈风力发电系统结构如图3所示。双馈风力发电机定子直接连接电网,功率单向流动,转子通过转子侧变流器和网侧变流器接入电网,功率则是双向流动。转子侧变流器主要任务是实现双馈风机的磁链及转矩的矢量解耦控制,捕获最大风能和实现定子的有功与无功调节;网侧变流器采用电压电流双闭环控制,既能配合转子侧变流器实现能量的双向流动,也能实现直流电压稳定和网侧功率因素可调等功能^[9]。

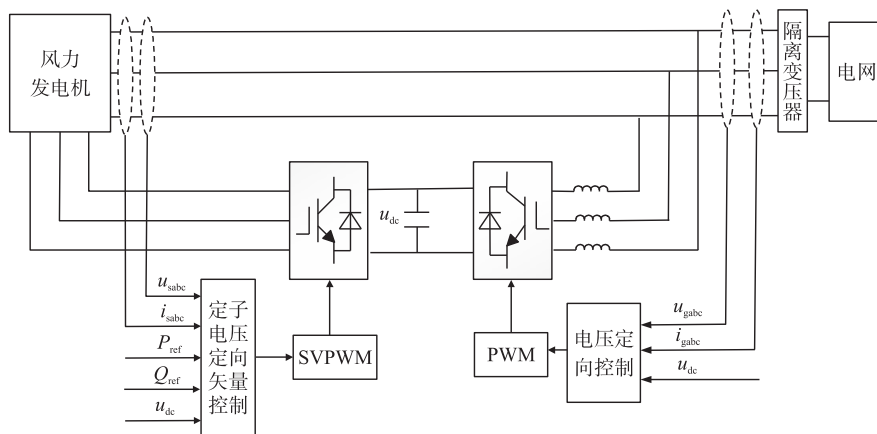


图 3 双馈风力发电系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of doubly-fed wind power generation system

1.3 储能装置

储能装置不仅能够平抑光伏、风机等分布式电源输出功率的随机性波动,也可在微电网系统发生故障时充当备用或应急电源,对微电网系统的稳定运行起着至关重要的作用^[10]. 双向 DC/DC 变换器可实现储能装置的充放电管理,其拓扑结构如图 4 所示.

本文选择双向交错并联的 Buck 和 Boost 结构组成. 当直流环节电压 U_{dc} 大于设定的直流参考电压 U_{dref} , 开关管 S_1 导通、 S_2 关断, 储能系统工作在 Buck 降压模式, 对外吸收电能; 当直流环节电压 U_{dc} 小于设定的直流参考电压 U_{dref} , 开关管 S_1 关断、 S_2 导通, 储能系统工作在 Boost 升压模式, 对外释放电能^[11].

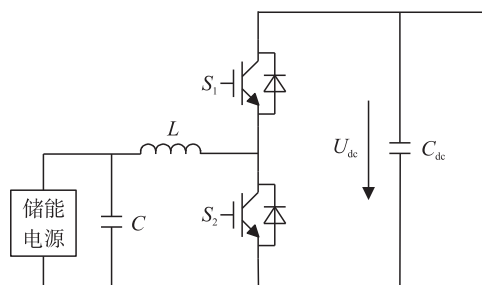


图 4 双向 DC/DC 变换器拓扑结构

Fig. 4 Topology of bidirectional DC/DC converter

1.4 冲击性负荷

冲击性负荷具有周期性或非周期性、瞬时突变和强非线性等特点,对供电系统的频率、电压波动、谐波等电能质量有很大的影响^[12]. 本文以典型的交流炼钢电弧炉为例,建立电弧模型数学表达式如下:

$$\frac{dy}{dt} = (i^2 - U_{arc}^2 y^2) \frac{k}{L \cdot r^2}, \quad (1)$$

式中, y 为电弧导纳; i 为电弧电流; U_{arc} 为电弧电压有效值; k 为与炉温 T 有关的参数; L 为电弧弧长; r 为电弧半径.

式(1)即为基于能量守恒定律的电弧模型,该模型以电弧导纳 y 作为状态变量,电弧电流 i 和弧长 L 作为输入,将炉温 T 、电弧电压有效值 U_{arc} 及电弧半径 r 等实际变量作为参数,从而得到较为准确的电弧炉运行特性.

利用上述电弧公式搭建单相电弧系统,通过 Simulink 仿真得出电弧半径和电弧阻抗曲线,如图 5 和图 6 所示.

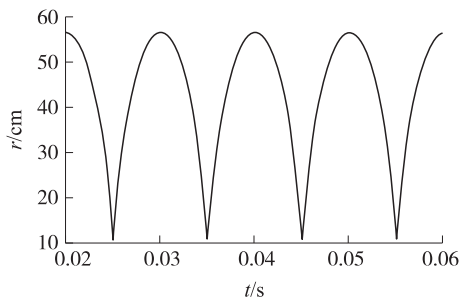


图 5 电弧半径曲线

Fig. 5 Arc radius curve

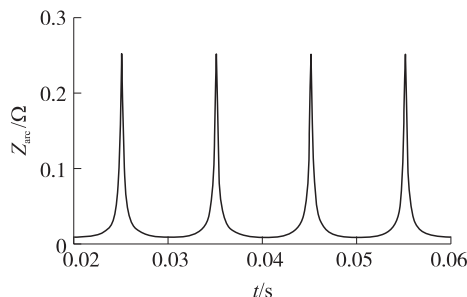


图 6 电弧阻抗曲线

Fig. 6 Arc impedance curve

由图 5 和图 6 可知,电弧炉运行时电弧呈现阻抗特性,当电弧半径减小(增大)时,电弧阻抗会迅速增大(减小),这些性质与电弧实际特性相符,证实了电弧模型的正确性。

2 系统电能质量分析

2.1 电能质量国家标准

本文重点研究冲击性负荷接入微电网系统引发的三相不平衡、谐波及电压波动问题。

2.1.1 三相不平衡

微电网中的三相不平衡主要来自微电源输出不平衡、三相线路参数不匹配及三相不平衡负载。供电系统中存在三相不平衡问题时,会增加损耗、使系统内产生零序及负序电流,影响微电网及相关设备的正常运行。根据国家标准规定,电网中正常运行下三相电压或电流不平衡度不能超过 2%,其瞬时值不能超过 4%;流入线路用户的不平衡度不能超过 1.3%。

2.1.2 谐波

谐波是周期性非正弦交流量在一个周期内任何与工频不同的一系列交流分量,其频率是工频的整数倍。当电网中存在大量的非线性、冲击性负荷时,将会产生很大的谐波污染。谐波对电力系统的危害极大,会影响测量仪器的测量结果,使电力装置发生误动作,对通信系统也会造成干扰。国标《电能质量公用电网谐波》中对各次谐波电流限值有所规定,国标中的 35 kV 的短路容量为 250 MVA,本文中 35 kV 的短路容量为 796 MVA,需进行换算,换算公式为:

$$I_b = \frac{S_{k1}}{S_{k2}} I_{hp}. \tag{2}$$

利用式(2)换算后的 35 kV 的各次谐波电流限值如表 1 所示。

表 1 各次谐波电流限值
Table 1 Limits of harmonic currents

标准电压/ kV	短路容量/ MVA	谐波次数及谐波电流限值/A											
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
35	796	48	39	25	39	17	28	12	13	9.8	17	8.2	14

2.1.3 电压波动

电压波动是指在一段时间内,电压有效值快速变化而偏离额定值的现象。供电系统中负荷的非线性、冲击性极易造成电压波动问题。电压波动的存在会直接影响电动机的转速,使照明设备发生闪烁现象。

国标《电能质量 电压波动和闪变》指出电压波动值 d 由电压有效值的两个极值 U_{\max} 和 U_{\min} 之差和电压额定值 U_N 比值的百分数表示。对应表达式为:

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\%. \tag{3}$$

国标中对电压波动值的限值标准如表 2 所示。对于电弧炉随机性不规则负荷引起的电压波动,表中标 * 为其限值。

表 2 电压波动值的限值标准

Table 2 Limit standard of voltage fluctuation value

$r/(次/h)$	$d/\%$	
	LV、MV	HV
$r \leq 1$	4	3
$1 < r \leq 10$	3 *	2.5 *
$10 < r \leq 100$	2	1.5
$100 < r \leq 1\,000$	1.25	1

2.2 仿真结果分析

电弧炉的运行过程可分为熔化期和精炼期。熔化期炉内温度不高,电弧会不断变化,输入功率波动剧烈,电能质量问题显著;精炼期炉温较高,电弧变化相对较小,电弧电流和电压较为稳定,电能质量问题较小。

电弧炉的三相不平衡正常是由于三相不对称电弧阻抗造成的,电弧阻抗和电弧长度紧密相关,因而可通过改变弧长大小分析电弧炉三相不平衡对微电网系统的影响。当 a 相、b 相电弧长度为 30 cm, c 相为 a、b 相 1.3 倍时,三相电弧电压波形及 35kV 并网点电压波形如图 7、图 8 所示。

当 c 相弧长增大时,该相电弧电压也会变大,其余两相电弧电压基本不变,验证了上述电弧模型中电弧电压仅与电弧长度成正比的结论。此外, c 相弧长的增大导致电弧炉负载三相不平衡,从而造成 35 kV 并网点电压的三相不平衡。

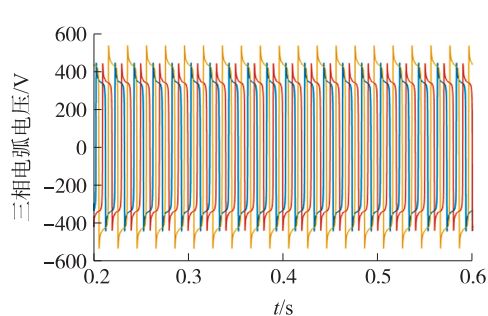


图 7 三相电弧电压波形

Fig. 7 Three-phase arc voltage waveform

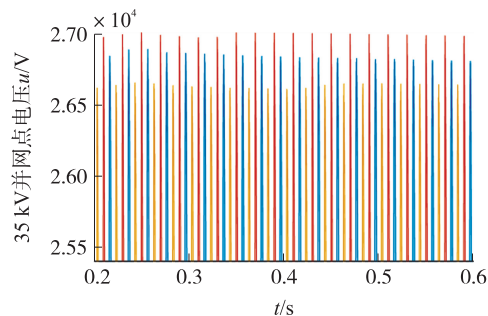


图 8 35 kV 并网点电压波形

Fig. 8 35 kV Voltage waveform of grid-connected point

熔化期电弧较细长,弧长变化范围大,电弧电流及电压波动剧烈,波动范围选为 25~45 cm^[13],则电弧电压的有效值波动范围在 290~490 V,参数的取值为 37.368 7。得到熔化期 35kV 并网点的瞬时电流后,利用快速傅里叶变换得出各次谐波的电流值,分析熔化期电弧炉对微电网造成的谐波污染。各次谐波电流值如表 3 所示。由表 3 可知,熔化期 35kV 并网点处 2 次谐波和奇次谐波数值很大,a 相的 2 次、5 次、7 次及 13 次谐波电流均超过谐波电流限值,b 相的 5 次和 7 次谐波电流超标,c 相的 2 次、5 次、7 次和 12 次谐波电流超出限值,接入微电网时需采取相应治理措施将各次谐波降低到限值以下。

表 3 熔化期 35 kV 并网点各次谐波电流值

Table 3 Harmonic current values of 35 kV grid-connected points in melting period

谐波	电流值/A			谐波	电流值/A		
	a 相	b 相	c 相		a 相	b 相	c 相
1	1 292	1 300	1 283	8	10.86	8.34	4.02
2	56.39	29.80	55.38	9	9.59	5.40	4.02
3	37.09	12.97	30.20	10	7.56	5.71	3.09
4	24.45	6.96	23.93	11	8.62	15.46	14.86
5	89.86	83.61	104.64	12	9.96	6.61	3.47
6	16.62	12.39	9.58	13	17.46	13.81	10.95
7	55.25	45.71	52.38				

熔化期由于炉料坍塌、电极与炉料接触,电极极易发生短路,此时电弧炉的无功功率快速变化,导致连接点的电压波动剧烈。当电弧炉三相电极同时短路时,对系统的无功冲击最大,进而造成电压波动也最大。仿真时,在 0.441~0.449 s 和 0.841~0.849 s 两个时间段发生电弧炉三相短路故障。运行过程中 35 kV 并网点处的无功和 a 相电压波形如图 9、图 10 所示。

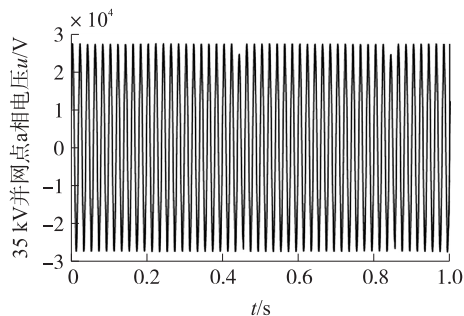


图 9 35 kV 并网点处无功波形图

Fig. 9 35 kV Reactive power waveform at grid-connected point

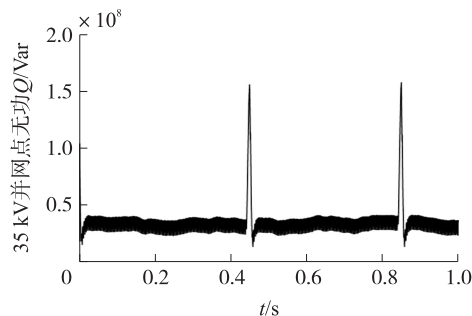


图 10 35 kV 并网点处 a 相电压波形图

Fig. 10 35 kV Phase a voltage waveform at grid-connected point

由图 9 可知,当电弧炉电极三相均发生短路时,无功功率从 30 MVar 急速升高至 155 MVar,故障消除后趋于稳定。由图 10 可以看出,故障发生时,35 kV 并网点处 a 相电压从 27.42 kV 快速跌落到 24.74 kV,根据电压波动值公式可算出最大电压波动值为 5.41%,超出国标给定的限值 3%。

3 结论

本文研究了接有典型非线性冲击负荷的微电网电能质量问题. 为了分析冲击性负荷对微电网的影响,本文选择了能够反映实际特性的电弧炉模型及风光储微电网并网系统模型. 针对电弧炉熔化期功率波动大,分析了熔化期存在的三相不平衡、谐波、电压波动电能质量问题. 仿真结果表明,电弧炉的三相不平衡会造成并网点电压(电流)的三相不平衡,电弧炉的2次、5次及7次谐波严重超标,电极发生三相短路故障时并网点电压波动值高于国标限值. 因此,冲击性负荷接入微电网运行后的电能质量分析与处理需进一步深入研究.

[参考文献](References)

- [1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
YANG X F, SU J, LÜ Z P, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70. (in Chinese)
- [2] ZHANG X N, FANG F, LIU J Z. Weather-classification-MARS-based photovoltaic power forecasting for energy imbalance market[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2019, 66(11): 8692-8702.
- [3] 张莉,孟克其劳,张占强,等. 基于 Matlab/Simulink 的风力发电机组电压波动与闪变仿真分析[J]. 可再生能源, 2016, 34(2): 214-219.
ZHANG L, MENG K Q L, ZHANG Z Q, et al. Simulation and analysis for voltage fluctuation and flicker of wind turbines by Matlab/Simulink[J]. Renewable energy resources, 2016, 34(2): 214-219. (in Chinese)
- [4] 李婉婷,李鹏,刘承佳,等. 风力发电并入微电网电能质量分析与检测[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(4): 86-90.
LI W P, LI P, LIU C J, et al. Analysis and detection of power quality with wind power interconnected with microgrids[J]. Power system and clean energy, 2012, 28(4): 86-90. (in Chinese)
- [5] 吴子阳. 三相光伏并网发电系统的电能质量分析[D]. 南昌:南昌大学, 2018.
WU Z Y. Power quality analysis of three-phase photovoltaic grid system[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018. (in Chinese)
- [6] 彭卉,邹舒,付永生,等. 冲击负荷接入电网的电能质量分析与治理方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 54-61.
PENG H, ZOU S, FU Y S, et al. Research of the power quality problem and treatment scheme for impact loads connected into Chongqing power system[J]. Power system protection and control, 2014, 42(1): 54-61. (in Chinese)
- [7] 袁思远,艾芊,黄东启. 带汽车充电站的微电网电能质量问题及网损分析[J]. 低压电器, 2013(9): 45-49.
YUAN S Y, AI Q, HUANG D Q. Power quality and network loss analysis of microgrid with car charging station[J]. Low voltage apparatus, 2013(9): 45-49. (in Chinese)
- [8] HATZIARGYRIOU N, ASAND H, IRAVANI, et al. Microgrids[J]. IEEE power and energy magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [9] 高扬,于会群,张浩,等. 变速恒频双馈风力发电系统并网控制仿真[J]. 电力科学与工程, 2014, 30(2): 1-6.
GAO Y, YU H Q, ZHANG H, et al. Investigation of control for VSCF doublefed wind power generation system connected to grid[J]. Electric power science and engineering, 2014, 30(2): 1-6. (in Chinese)
- [10] 侯军. 含多种分布式电源的微电网的运行控制与分析[D]. 北京:北京交通大学, 2015.
HOU J. Operation control and analysis of microgrid with different types of distributed generators[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [11] 王成山. 微电网分析与仿真实理论[M]. 北京:科学出版社, 2013.
WANG C S. Microgrid analysis and simulation theory[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [12] 宁玉宝. 大型冲击性负载对微电网影响及治理关键技术研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
NING Y B. Study on influence and key technology of large capacity surge load on the power grid[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [13] 全永博,刘征,罗玉鐳,等. 采用长弧操作的高阻抗电弧炉[J]. 冶金设备, 2014(6): 20-24.
TONG Y B, LIU Z, LUO Y Z, et al. High impedance EAF of long arc operation[J]. Metallurgical equipment, 2014(6): 20-24. (in Chinese)