

基于 ETAP 的钢铁企业电网谐波分析

聂陆燕, 尹玉君, 谢传治

(南瑞集团有限公司/国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 基于对炼钢生产线上主要用电设备的谐波产生原因和谐波特性的充分调研, 以某实际钢铁企业电网为例, 利用 ETAP 软件对其供电系统进行详细建模。重点研究谐波在钢铁企业电网中的传播特性, 明确钢铁企业电网在公共连接点处(PCC)的谐波污染责任。并仿真计算可能出现的谐振点, 通过案例分析验证谐振原因。最后, 针对系统内出现的并联谐振设计滤波器, 为企业电网的谐波谐振抑制和电能质量提高提供一种方法。

关键词: 谐波; 电弧炉; 变流器; 并联谐振

Harmonic analysis of power grid in iron and steel enterprises based on ETAP

NIE Luyan, YIN Yujun, XIE Chuanzhi

(NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Based on the investigation of harmonic generation reason of the main equipment and its harmonic characteristics in the steelmaking line, the power system of an iron and steel enterprise is modeled by ETAP software. The propagation characteristics in the power grid is studied and the harmonic pollution responsibility of the iron and steel enterprises in the PCC is clear. The possible resonant points are found out via simulation and calculation and the resonant causes are analyzed and verified. Finally, the filter is designed according to parallel resonance in system. It provides a method for harmonic and resonance suppression and power quality improvement of enterprise power grid.

This work is supported by National Science and Technology Support Program of China (No. 2015BAA01B04).

Key words: harmonic; electric arc furnace; converter; parallel resonant

0 引言

钢铁企业作为工业用电大户, 对安全生产的要求很高, 但企业内部含有大量的非线性负荷、冲击负荷和大功率可控硅变流装置, 导致谐波污染问题日益突出, 严重影响电网的电能质量^[1-4]。为改善电能质量, 此类企业大量应用串并联补偿电气装置, 若配置不当则可能产生谐振^[5], 给企业安全稳定运行带来较大危害。笔者前期调研重庆某钢厂时发现, 该厂经常出现因为谐波问题引起的电容器爆炸等事故^[6]。因此, 建模仿真谐波在钢铁企业电网的传播特性, 对准确合理地划分钢铁企业的谐波污染责任和有效抑制谐波造成的危害有重要的现实意义。

目前, 国内外在谐波污染责任划分上的研究体现的都是系统和用户双方的共同责任, 划分的主要依据是用户与系统双方注入的谐波电流各自在公共连接点 PCC 处所引起的谐波电压降^[7]。而这些大都

局限于系统侧大电网的背景谐波研究, 对于用户侧, 则一般选择在企业电网内安装监测装置。对企业电网的谐波研究也多局限于某个具体设备的电气系统^[8-10], 很难全面、整体地了解和把握钢铁企业电网的谐波污染情况。因此, 本文从调研钢铁企业炼钢设备的谐波产生原因及谐波特性出发, 以某实际钢铁企业电网为例, 利用 ETAP 软件对该企业电网进行详细建模。基于此模型, 研究谐波在该企业电网的传播特性, 明确该钢铁企业对 PCC 处的谐波污染贡献及谐波责任划分, 并对于企业电网内部谐波污染较为严重的节点查找原因, 设计案例分析和验证, 最后针对谐振点设计滤波器抑制谐振的发生, 减小钢铁企业电网的谐波污染危害, 提高企业电网的电能质量。

1 炼钢工艺流程及设备的谐波特性分析

1.1 炼钢工艺流程

现代炼钢一般分为长流程炼钢和短流程炼钢两种方式, 如图 1。长流程炼钢多了用铁矿石炼出铁

水这一环节,而短流程炼钢因其在投资、效率和环保等方面的优势,近年来发展迅速。在短流程炼钢工艺中,由电弧炉或中频炉初炼出钢水,经过精炼炉得到合格钢水,连铸成钢锭或钢坯,最后经过各种轧钢工艺成为成品钢。在整个炼钢工艺流程中,电弧炉、中频炉、精炼炉和轧钢机等都会产生大量的谐波。



图 1 长流程炼钢和短流程炼钢

Fig. 1 Long process steelmaking and compact process steelmaking

1.2 炼钢设备电气系统的谐波特性分析

电弧炉利用交流电弧产生的热来熔炼金属。由于电弧延时发弧、电弧游动等电弧电阻的非线性因素,电弧电流出现波形畸变。中频炉把工频交流电整流成直流,再逆变为可调节的中频(300~1000 Hz)电流。电流流经感应圈和负载,由电磁感应产生切割金属材料的高密度磁力线,通过炉料中感应出的涡流熔化金属。中频炉会产生大量的奇次谐波电流。精炼炉是电弧炉的一种特殊形式,由石墨电极产生电弧对初炼钢水进行加热精炼,会产生 2~7 次谐波。轧钢机是实现金属轧制过程的设备,主要为交直流传动设备。交流电经过整流变压器与大功率整流设备供电给直流电机,会产生大量的奇次谐波电流。

由上述可知,电弧炉和精炼炉的谐波产生机制

表 2 变流器特征谐波电流

Table 2 Characteristic harmonic currents of converters

脉波数 P	谐波次数及幅值(相对于基波电流的标幺值)%									
	5	7	11	13	17	19	23	25	47	49
6	20.0	14.3	9.1	7.7	5.9	5.3	—	—	—	—
12	1.8	1.6	6.6	5.4	0.33	0.3	1.5	1.3	—	—
24	1.88	1.23	0.36	0.22	—	—	1.09	0.87	0.22	0.22

2 基于 ETAP 的某钢铁企业电网建模

ETAP 是由美国 OTI 公司生产的一款全图形界面的电力系统仿真分析软件。ETAP 软件的谐波分析模块主要包括谐波潮流计算和谐波频率扫描两个功能。

2.1 系统建模

在 ETAP 中搭建某钢铁企业电网模型,如图 2 所示。

相同,轧钢机和中频炉的谐波产生机制相同,前者是基于电弧电阻的非线性,后者是基于各种含半导体大功率变流器。因此本文将主要对电弧炉和变流器进行谐波特性分析。

1.3 电弧炉谐波特性

电弧炉炼钢过程主要分为两个时期:熔化期和精炼期。熔化期,频繁的电极短路及相应调节过程,钢液沸腾而造成的弧长波动,三相电弧的相互力及炉料温度较低时造成的弧长随机扰动,都是造成电弧炉电阻非线性原因^[11]。熔化期电弧极不稳定,波形畸变较为严重。精炼期,电弧电流则比较稳定,畸变也较小。典型电弧炉谐波电流含有率统计结果见表 1^[12]。

表 1 电弧炉典型谐波电流

Table 1 Characteristic harmonic currents of electric arc furnace

时期	谐波次数及幅值(相对于基波电流的标幺值)%				
	2	3	4	5	7
熔化期	7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
精炼期	—	2.0	—	2.1	—

1.4 变流器的谐波特性分析

变流器在将交流转换为直流(以及将直流逆变为交流)的过程中会形成脉动的电压电流波形,并会产生大量谐波。 p 脉波的变流器在理想三相对称条件下所产生的谐波次数为 $h=k_p \pm 1$, 其中 $k=1, 2, 3, \dots$ 。假定电网换相变流器的直流电流平直,第 h 次谐波的理论幅值为 $I_h=I_1/h$ (式中 I_1 为基波的幅值)。实际上,由于各种非理想因素(电网电压不对称,触发延迟角不对称等)的存在,幅值也会略有不同。大量统计表明,六脉波及其以上的变流器所产生的谐波电流与基波电流之比的典型值如表 2 所示^[13]。

该钢铁企业电网电压等级为 110 kV,通过区 1 号主变和区-外双回线连接到 220 kV 外网变。各级系统参数如下。

1) 外网变:该企业电网的外部等效电网,基准电压为 220 kV,最小短路容量为 9149 MVA, $X/R=45$ 。

2) 110 kV 供电方式:区 1 号主变中压侧开关供 110 kV 东 11 母线,经分段开关供 110 kV 东 13 母线。

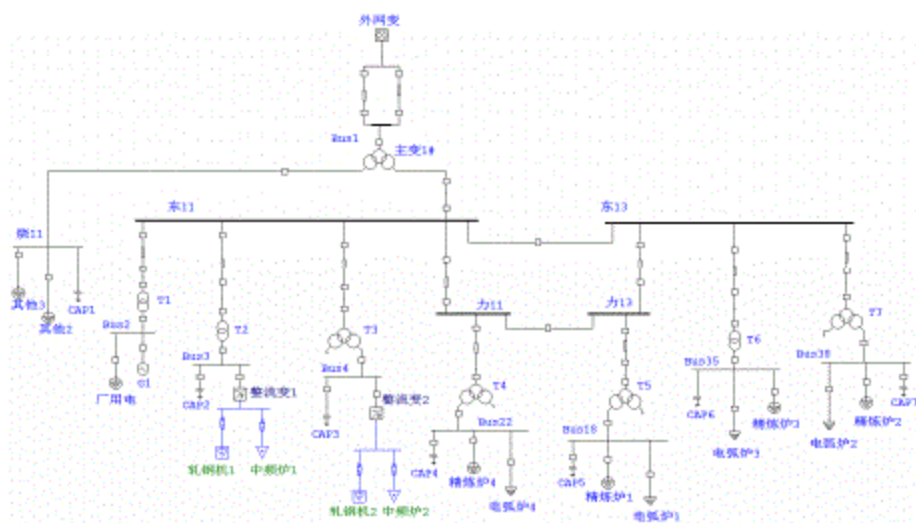


图2 某钢企业电网 ETAP 单线图模型

Fig. 2 One-line diagram of a steel enterprise

110 kV 东 11 母线送出: 东厂 1 线(带 135 MW 发电机一台, 出力 130 MW, 厂用电 10 MW)、东轧 1 线(经 T2 变、整流变 1 带 1100 V 直流轧钢机 1 和中频炉 1 负荷, 共 57.9 MW)、东轧 2 线(经 T3 变、整流变 2 带 1100 V 直流轧钢机 2 和中频炉 2 负荷, 共 44.3 MW)、力变开关站的力 11 线(经 T4 变带电弧炉 4、精炼炉 4 负荷, 共 26.3 MW), 力 11 线通过分段开关供力 13 线。

110 kV 东 13 母线送出: 力变开关站力 13 线(经 T5 变带电弧炉 1、精炼炉 1 负荷, 共 16.6 MW)、东电 3 线(经 T6 变带电弧炉 3、精炼炉 3 负荷, 共 40.6 MW)、东电 2 线(经 T7 变带电弧炉 2、精炼炉 2 负荷, 共 27 MW)。

3) 35 kV 供电方式: 区 1#主变低压侧开关供 35 kV 烧 11 母线, 带烧碱负荷共 30.9 MW。

4) 负荷: 总负荷为 253.7 MW, 负荷功率因数约为 0.92, 分别为电弧炉、精炼炉、中频炉、轧钢机和烧碱负荷, 其中, 电弧炉和精炼炉负荷约占 52%, 中频炉和轧钢机约占 32%。中频炉和轧钢机的整流系统都是 12 脉波。

5) 企业电网内部变压器参数如表 3 所示。

表 4 为该钢铁企业电网的潮流分析结果, 与企业实际运行情况相符。

2.2 谐波仿真分析

忽略系统侧的背景谐波, 将变流器的各次特征谐波电流叠加生成自定义的变流器谐波电流源, 添加到单线图的整流器元件中, 电弧炉同理。运行谐波潮流, 结果如表 5 所示。其中 Bus1 为公共连接点(PCC)。

表 3 变压器参数

Table 3 Transformer parameters

双绕组变压器					
变压器	额定容量/ MVA	额定电压/ kV	正序阻抗/%		
T2	63	110/10.5	11.91		
T6	63	110/10.5	12.03		
三绕组变压器					
变压器	额定容量/ MVA	额定电压/ kV	正序阻抗/%		
			高-中 侧	高-低 侧	中-低 侧
主变 1	180/180/90	220/110/35	13.94	24.23	7.99
T3	80/80/48	110/35/10.5	10	18.19	6.46
T4	31.5/31.5/25	110/10.5/6.3	10.73	18.55	6.54
T5	31.5/31.5/25	110/10.5/6.3	10.73	18.55	6.54
T7	80/80/48	110/35/10.5	10	18.19	6.46

表 4 某钢企业电网潮流分析结果统计表

Table 4 Power flow results of power grid of a steel enterprise

参数	结果
发电机出力/MW+Mvar	130+j34.71
外网变出力/MW+Mvar	124.6+j48.74
总负荷/MW+Mvar	253.7+j109.4
损耗/MW+Mvar	0.85+j48.56
无功补偿/Mvar	j75.2
电压/kV	113.4

由表中可看出, PCC 处谐波电压总畸变率为 0.44%, 满足国标要求。但是企业内部电网中个别节点处电压总畸变率和各次谐波畸变率超标, 其中 Bus35 处尤其严重, 总畸变率为 13.96%, 7 次谐波电压畸变率为 13.07%。频率扫描显示 Bus35 处 7 次谐波阻抗为 19.02 Ω , 其各次谐波的阻抗特性如图 3 所示。Bus35 处 7 次谐波发生了并联谐振。

表 5 某钢铁企业电网谐波分析结果

Table 5 Harmonic analysis results of power grid of an iron and steel enterprise

线路	谐波次数及谐波幅值(相对于基波电压的标么值)%											总畸变率/%
	2	3	4	5	7	11	13	17	19	23	25	
Bus1	0.12	0.17	0.18	0.26	0.18	0.10	0.03	0	0	0	0	0.44
Bus3	1.02	1.06	2.26	2.51	1.53	4.37	2.77	0.11	0.09	0.35	0.28	6.55
Bus4	1.05	1.17	2.94	5.92	0.54	2.40	1.60	0.07	0.05	0.22	0.17	7.41
Bus18	0.96	0.96	1.92	3.41	3.38	0.6	0.07	0	0	0	0	5.38
Bus22	1.0	1.15	2.29	4.03	1.54	0.29	0.04	0	0	0	0	5.12
Bus35	2.28	2.59	2.05	2.73	13.07	0.73	0.08	0	0	0	0	13.96
Bus38	2.03	5.06	2.13	3.17	5.52	0.53	0.06	0	0	0	0	8.66

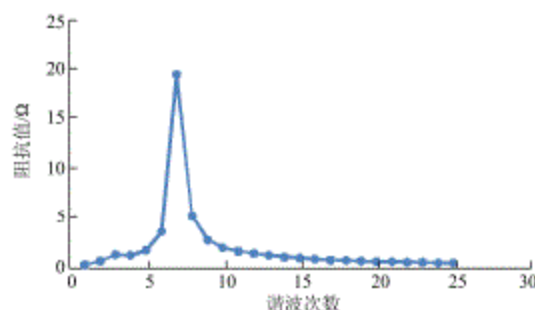


图 3 Bus35 处的谐波阻抗大小图

Fig. 3 Harmonic impedance at Bus35

2.3 谐振原因分析

将该钢铁企业电网的整个单线图模型在 Bus35 处由戴维南等效电路表示,如图 4。系统的短路容量为 SCC_{35} , R_s 、 X_s 为从 Bus35 处看进去的系统等效电阻和电抗, U_{35} 为 Bus35 处的额定电压。C 为 Bus35 处的并联电容器组,阻抗为 X_c ,容量为 Q_c 。

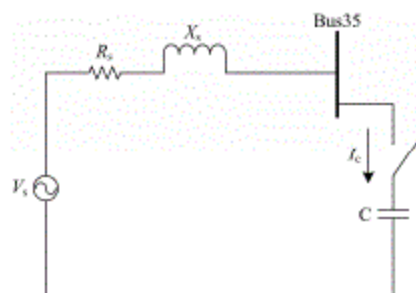


图 4 戴维南等效电路

Fig. 4 Thevenin equivalent circuit

忽略电阻,不考虑电容器投入之后的电压上升。系统等效阻抗为 X_s 。

用标么值表示,取基准容量为 S_B ,基准电压为 U_B ,基准阻抗 Z_B 。如果 Bus35 额定电压 U_{35} 与基准电压 U_B 相等,则有:

$$Z_B = \frac{U_B^2}{S_B}$$

$$X_s^* = \frac{X_s}{Z_B} = \frac{U_{35}^2 / SCC_{35}}{U_B^2 / S_B} = \frac{1}{SCC_{35}^*}$$

$$X_c^* = \frac{X_c}{Z_B} = \frac{U_c^2 / Q_c}{U_B^2 / S_B} = \frac{1}{Q_c^*}$$

并联谐振时,系统谐振频率 f_r 为

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}} = f_0 \sqrt{\frac{X_c^*}{X_s^*}} = f_0 \sqrt{\frac{SCC_{35}^*}{Q_c^*}}$$

式中, f_0 为基准频率 50 Hz。定义谐波的谐振次数 h_r 为

$$h_r = \frac{f_r}{f_0} = \sqrt{\frac{X_c^*}{X_s^*}} = \sqrt{\frac{SCC_{35}^*}{Q_c^*}} \quad (1)$$

由式(1)可知, Bus35 处发生的并联谐振主要由 Bus35 处系统的短路容量和电容器的额定功率决定。

假定,基准容量为 1000 MVA。经过计算,从 Bus35 处看进去,系统等效阻抗为

$$Z_{35}^* = 2.174 \angle 87.96^\circ$$

$$|SCC_{35}^*| = \frac{1}{|X_{35}^*|} = 0.46$$

并联电容器组的额定容量为 10 Mvar。

$$Q_c^* = \frac{10}{1000} = 0.01$$

$$h_r = \sqrt{\frac{SCC_{35}^*}{Q_c^*}} = \sqrt{\frac{0.46}{0.01}} = 6.78 \approx 7$$

误差的存在,主要是因为 ETAP 在求取母线处的谐波等效阻抗时,对系统各元器件电阻的谐波模型处理方法跟国内不一样^[14]。国内通俗做法如式(2),而 ETAP 处理方法如式(3)。

$$R_h = R_{dc} \quad (2)$$

$$R_h = R_{dc} (1 + Ah^B) \quad (3)$$

式中: R_{dc} 为直流电阻; $A=0.1$; $B=1.5$ 。

接下来采用两个例子来验证式(1)的正确性。改

变电容器组的容量,由式(1)推导出发生并联谐振的谐波次数如表6所示。

表6 两个案例的参数

Table 6 Parameters of two examples

电容器容量 Q_c/kvar	hr
19 600	5
2900	13

依次仿真得到 Bus35 处阻抗大小,结果如图5、图6,基本验证了式(1)的正确性。并且可以得出:随着电容器组容量的增加,谐振频率向低值偏移;随着系统短路容量的增加,谐振频率向高值偏移。

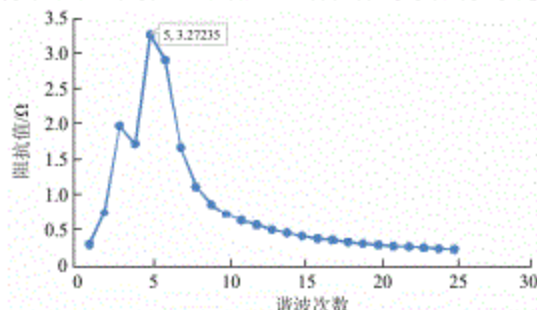


图5 不同的电容器容量, Bus35 处的谐波阻抗值

Fig. 5 Harmonic impedance at Bus35 for different capacitor capacities

2.4 无源滤波器设计

在实际电力系统中,投切电容器能够改变电网

表8 单调谐滤波器投入前后系统谐波对比

Table 8 Comparison of monotonic harmonic analysis results before and after filter's operation

线路	7次谐波幅值(相对于基波电压的标么值)/%		总畸变率/%	
	投入前	投入后	投入前	投入后
Bus1	0.18	0.11	0.44	0.38
Bus35	13.07	0.26	13.96	4.95
Bus38	5.52	4.22	8.66	7.89

3 结论

钢铁企业里拥有电弧炉、中频炉等大容量非线性负荷,再加上大量使用的晶闸管变流装置、交-交、交-直变频器等设备,极大加重了企业电网的谐波污染。本文从工程实用角度出发,以较为直观方便的手段将炼钢设备产生的谐波简化成各次谐波电流的叠加模型,在对某实际钢铁企业电网精确建模的基础上,仿真分析谐波在该企业电网中的传播特性,对明确 PCC 处该企业电网谐波污染责任划分有实用价值。通过仿真定位可能发生的谐振点,并通过谐振原因分析和案例验证为企业电网抑制谐波的并联谐振和提高电能质量提出了一个较为方便快捷的方法,具有很好的工程实用价值。

运行方式^[15]。对于并联谐振,一般通过设计滤波器来消除。在 Bus35 的 10.5 kV 母线侧设 7 次单调谐滤波器,主要参数如表 7。

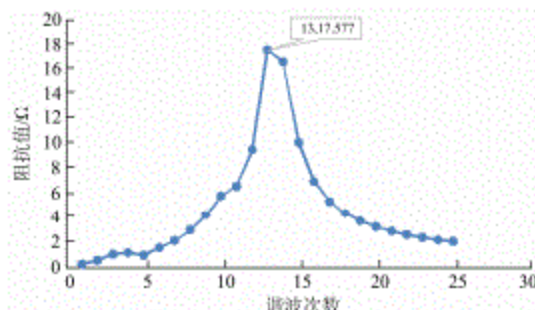


图6 不同的电容器容量, Bus35 处的谐波阻抗值

Fig. 6 Harmonic impedance at Bus35 for different capacitor capacities

表7 单调谐滤波器参数

Table 7 Monotonic filter parameters

滤波器	容量/kvar	电阻 R/Ω	电感 L/mH	电容 $C/\mu\text{F}$
7次单调谐	144	0.392	7.129	4.145

运行谐波潮流模块,得到投入滤波器后的仿真计算结果,并与滤波器投入前的结果对比。如表8。由表可知,该组单调谐滤波器能很好地抑制 Bus35 处的 7 次谐波并联谐振。

参考文献

- [1] 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]. 继电器, 2014, 42(1): 54-61. PENG Hui, ZOU Shu, FU Yongsheng, et al. Research of the power quality problem and treatment scheme for impact loads connected into Chongqing power system[J]. Relay, 2014, 42(1): 54-61.
- [2] 艾永乐, 郑建云. 基于谐波有功功率贡献量的主谐波源定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 16-22. AI Yongle, ZHENG Jianyun. Localization of the main harmonic source based on the harmonic active power contributions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 16-22.

- [3] 曾江, 于文俊, 余涛. 东莞配电网谐波测量及其统计分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 167-171, 176.
ZENG Jiang, YU Wenjun, YU Tao. Harmonic survey and statistical analysis of distribution network in Dongguan[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 167-171, 176.
- [4] 余培岩, 马卫平, 王淑娟, 等. 谐波引发的大面积低压电器烧损原因分析[C] // 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会, 第三届电能质量(国际)研讨会论文集, 2006年4月2日-6日, 三亚, 中国.
YU Peiyan, MA Weiping, WANG Shujuan, et al. Analysis of large area low voltage electrical apparatus burnt by harmonic[C] // National Standardization Technical Committee for Voltage and Current Levels and Frequency, Proceedings of the 3rd International Symposium on Power Quality (International), April 2-6, 2006, Sanya, China.
- [5] 张民, 何正友, 高仕斌. 不同负荷模型下高速铁路牵引供电系统谐波谐振敏感度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 21-28.
ZHANG Min, HE Zhengyou, GAO Shibin. Harmonic resonance modal sensitivity analysis for high-speed railway traction supply system considering different harmonic load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 21-28.
- [6] 邓朴, 刘晓波, 皮显松, 等. 电容器串联电抗消除谐振的最大值最小优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 71-78.
DENG Pu, LIU Xiaobo, PI Xiansong, et al. Minimax optimization of reactance connected in series on capacitor to eliminate resonance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 71-78.
- [7] 惠锦, 杨洪耕, 叶茂清. 多谐波源条件下的谐波污染责任划分研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 48-53.
HUI Jin, YANG Honggeng, YE Maoqing. Research on the responsibility partition of harmonic pollution of multiple harmonic sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 48-53.
- [8] 刘小河, 杨秀媛. 电弧炉电气系统谐波分析的频域方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 30-35.
LIU Xiaohu, YANG Xiuyuan. Research on harmonic analysis of arc furnace electric system based on frequency domain method[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 30-35.
- [9] 王晶, 束洪春, 林敏, 等. 用于动态电能质量分析的交流电弧炉的建模与仿真[J]. 电工技术学报, 2003, 18(3): 53-58.
WANG Jing, SHU Hongchun, LIN Min, et al. Modeling and simulation of AC arc furnace for dynamic power quality studies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(3): 53-58.
- [10] 李德武, 齐延章. 中频感应电炉产生的谐波及谐波治理[J]. 华北电力技术, 2010(6): 16-20.
LI Dewu, QI Yanzhang. Harmonic generated by medium-frequency induction furnace and its suppression[J]. North China Electric Power, 2010(6): 16-20.
- [11] 邓菲. 电弧炉谐波电流抑制及其综合治理[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [12] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [13] WAKILEH G J. 电力系统谐波-基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [14] Power Systems Engineering Committee of the Industrial and Commercial Power Systems Department of the IEEE Industry Applications Society. IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis: IEEE Std 399—1997[S]. IEEE, 1997.
- [15] 吕洋, 徐政. 投切电容器时的电网谐波阻抗测量方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1780-1784.
LÜ Yang, XU Zheng. Network harmonic impedance measurement using capacitor switching[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1780-1784.

收稿日期: 2016-12-06

作者简介:

聂陆燕(1986—), 女, 通信作者, 研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: nieluyan@sgepri.sgcc.com.cn

尹玉君(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: yinyujun@sgepri.sgcc.com.cn

谢传治(1978—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: xiechuanzhi@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)