

高速铁路牵引供电系统对区域电网电能质量的影响研究

高速铁路牵引供电系统接入电网会产生谐波、负序等电能质量问题。介绍了高速铁路牵引供电系统结构特点，分析了典型V/V接线牵引变压器谐波、负序电流特性，利用PSASP中的电能质量分析模块结合牵引负荷的运行方式，对高速铁路牵引供电系统接入的区域电网电能质量各项指标进行了仿真计算。根据计算结果评估了高速铁路牵引供电系统对区域电网的具体影响程度，最后对高速铁路牵引供电系统电能质量问题提出了相应的建议和措施。

贺明 王冲 牛犁/国网西安供电公司

0 引言

高速铁路（以下简称高铁）牵引负荷具有非线性、波动性和随机性，其向区域电网注入谐波、负序分量，严重威胁区域电网安全稳定运行^[1-2]，一直是铁道部门和电力部门关注的焦点。负序分量给区域电网内旋转电动机造成附加发热和振动，危及安全运行和正常出力，超标的负序分量还会干扰以负序参量为起动元件的继电保护误动作，降低电网可靠性；谐波会造成系统损耗增加，使电气测量仪表和电能计量出现较大偏差，产生的电压波形畸变影响电力设备寿命和供电质量^[3-4]。

目前关于牵引供电系统谐波、负序的影响评估方法很多，文献[5]采用点对点分析了牵引供电系统的谐波和负序问题并利用割集方法作了详细计算，分析评估了计算结果。文献[6]将牵引供电系统参数由两相转换为三相，统一了网络拓扑结构，利用三相计算方法，分析了负序电流对三相电压不平衡度的影

响。文献[7]针对高铁典型的V/V接线牵引变压器，分析了谐波和负序电流的特点，基于PSCAD/EMTDC建立了区域电网仿真模型，针对谐波、负序问题进行了仿真研究。文献[8-9]比较分析了IEC 61000-3-6、GS/4和谐波国标GB/T 14549-1993，给出了牵引供电系统谐波发射限值的计算和分配，对谐波评估中具有争议的观点作出了解释，指出谐波阻抗的合理等效是畸变电压和电流限值转换的关键。现有研究对象虽各有侧重方向，但局限于接入点的电能质量影响，未考虑对区域电网整体的影响。现有研究也多针对普通电气化铁路，高铁牵引供电系统供电电压高，一般接入220 kV、330 kV系统，进线电源接点短路容量大，牵引负荷重，运行条件复杂。

本文首先介绍了高铁牵引供电系统的结构，分析了牵引供电系统引起的电能质量问题，给出了各项指标计算方法，然后利用电力系统分析综合程序（PSASP）电能质量分析模块，对接入高铁牵引供电系统区域电网各项电能质量指标进行仿真计算。根据计算结果评估了高铁牵引供电系统的谐波、负序问题，并提出可行的治理措施。对高铁牵引供电系统接入区域电网电能质量问题的评估和防治具有一定的参考意义。

1 高铁牵引供电系统结构

高铁牵引供电系统将电网三相交流电（50 Hz）转换为单相交流电（频率不变，额定电压27.5 kV或 2×27.5 kV），



贺明/工程师

关键词/Keywords

高速铁路·
牵引供电系统·
V/V牵引变压器·
谐波·
负序·

其结构如图1所示，主要由三相电力系统（外部电源）、牵引变电站、牵引网和电力机车构成。牵引网包括接触网、电分相、回流线和钢轨等。

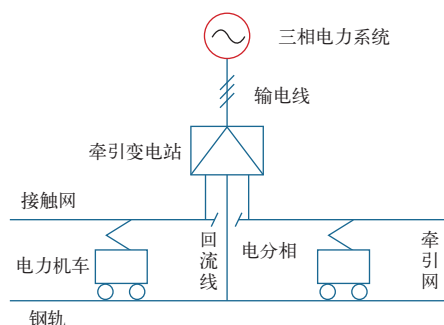


图1 高铁牵引供电系统

1.1 牵引网供电方式

目前牵引网的主要供电方式：直接供电方式、吸流变压器（Booster-Transformer, BT）供电方式、自耦变压器（Auto-Transformer, AT）供电方式以及同轴电缆（Coaxial Cable, CC）供电方式^[10]。高铁牵引网一般采用AT供电方式，如图2所示，优点：①供电距离长，可达到40~50 km，增大了牵引站之间距离，降低了高铁建设投资；②牵引网阻抗小，降低了电压损失和电能损失。因此，AT供电方式适应于高速、大功率电力机车运行。

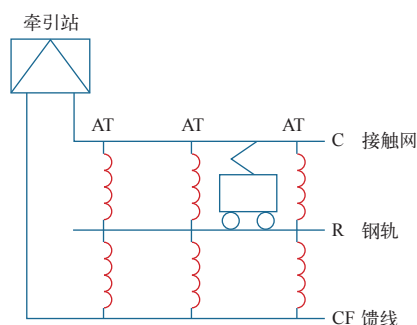


图2 AT供电方式

1.2 牵引变压器接线方式

牵引变压器的主要接线方式：单相接线、V/V接线、YNd11接线、Scott接线和阻抗匹配平衡接线五种接线方式，我国高铁多采用两台单相三绕组牵引变压器构成的V/V接线形式^[11-12]。如图3所示，牵引变压器低压侧a相和b相分接到a馈电臂和b

馈电臂，c相连接轨道接地。高压侧接进线电源，相别逐次轮换，对应的低压侧两臂和进线电源的相别也随之轮换，但a臂和b臂的延伸方向保持不变，确保两个相邻牵引站的相邻馈线臂处于同相位。

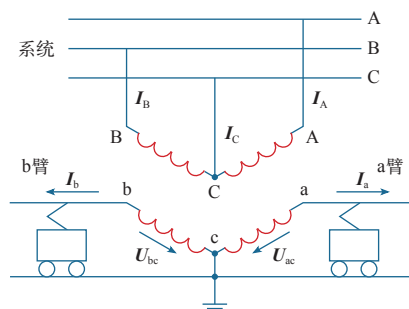


图3 V/V接线牵引变压器

1.3 高铁电力机车

高铁电力机车采用交-直-交传动系统，时速高、牵引负荷大、负载率高且受电时间长，对供电可靠性要求更高，结构如图4所示。电力机车包括车载变压器、牵引变流器和牵引电动机三部分。牵引变流器由单相三电平脉冲整流器、直流部分和三电平逆变器三个环节组成。采用单相三电平PWM整流技术后降低了低频带的谐波含有率，等于加装了有源电力滤波器^[13]，但高铁牵引负荷功率大幅增加，负序问题变得更为突出。表1为CHR2动车组牵引工况下的95%谐波特性统计数据。

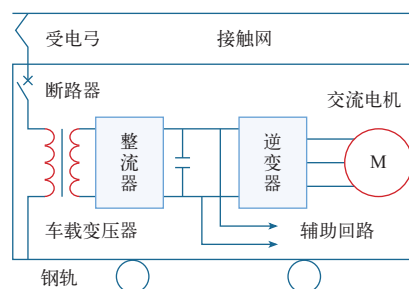


图4 交-直-交型电力机车结构图

表1 CHR2牵引工况下谐波含有率

谐波次数	谐波含量 (%)	谐波次数	谐波含量 (%)	谐波次数	谐波含量 (%)
1	100	15	0.20	29	0.17
3	2.20	17	0.20	31	0.17
5	1.35	19	0.20	33	0.18

(续)

谐波 次数	谐波含量 (%)	谐波 次数	谐波含量 (%)	谐波 次数	谐波含量 (%)
7	0.80	21	0.18	35	0.25
9	1.05	23	0.17	37	0.27
11	0.55	25	0.17	39	0.80
13	0.25	27	0.16	—	—

2 高铁牵引供电系统电能质量指标计算

2.1 V/V接线牵引变压器谐波电流计算

假定牵引供电系统外部电源为幅值相等相位相差 120° 的标准正弦波,不考虑牵引变压器的空载电流,按图3可得牵引变压器高压侧与低压侧电流关系矩阵为

$$\begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} = \frac{1}{K} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, K 为牵引变压器电压比。设 $U_{BC} = U_{BC} \angle 0^\circ$ 为基准电压,b臂和a臂的 h 次谐波电流为 I'_h 和 I''_h ,幅值和相位为 I'_h 、 I''_h 、 φ_{h1} 和 φ_{h2} 。则A、B和C三相谐波电流矩阵表达式为

$$\begin{pmatrix} I_{Ah} \\ I_{Bh} \\ I_{Ch} \end{pmatrix} = \frac{1}{K} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I''_h \\ I'_h \end{pmatrix} \quad (2)$$

谐波电流幅值表达式为

$$\begin{cases} I_{Ah} = I''_h / K \\ I_{Bh} = I'_h / K \\ I_{Ch} = \sqrt{I_h'^2 + I_h''^2 - 2I_h''I_h' \cos(\varphi_{h1} - \varphi_{h2})} / K \end{cases} \quad (3)$$

由式(2)可知当 I'_h 等于0、 I''_h 不为0,即b臂无电力机车时,A、C相谐波电流存在且幅值相等。当两臂都带有电力机车,且机车负荷相等时,则A、B两相谐波含量相同。

2.2 V/V接线牵引变压器负序电流计算

对于交—直—交型机车负荷如果只考虑基波分量,功率因数假定为1,按图3a臂和b臂电压为 U_{ac} 和 U_{bc} , U_{ac} 滞后 U_{bc} 60° 则 I_a 滞后 I_b 60° 。若以 I_b 为基准值,则 $I_b = I_b$, $I_a = I_a e^{-j60^\circ} = -a^2 I_a$,其中 $a = e^{j120^\circ}$ 。将 I_a 和 I_b 代入式(1)中则

$$\begin{cases} I_A = -a^2 I_a / K \\ I_B = I_b / K \\ I_C = (a^2 I_a - I_b) / K \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)结合对称分量法^[14]可得 I_A 正序、负序和零序电流为

$$\begin{cases} I_{A+} = \frac{1}{\sqrt{3}K} (I_b + I_a) e^{-j90^\circ} \\ I_{A-} = \frac{1}{\sqrt{3}K} (I_b + a I_a) e^{j90^\circ} \\ I_{A0} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

三相电流不平衡度为

$$\varepsilon = \frac{|I_{A-}|}{|I_{A+}|} \times 100\% = \frac{\sqrt{I_b^2 + I_a^2 - I_b I_a}}{I_b + I_a} \times 100\% \quad (6)$$

2.3 谐波电压计算

根据文献[15]第 h 次谐波电压含有率定义为 HRU_h ,电压总谐波畸变率定义为 THD_u

$$\begin{cases} THD_u = \frac{U_H}{U_1} \\ HRU_h = \frac{U_h}{U_1} \\ U_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中, U_h 为第 h 次谐波电压(方均根值); U_1 为基波电压(方均根值); U_H 为谐波电压含量。

第 h 次谐波电流分量 I_h 与 h 次谐波电压含有率 HRU_h 的关系为

$$HRU_h = \frac{\sqrt{3}hU_N I_h}{10S_k} \quad (8)$$

式中, U_N 为系统额定电压,kV; I_h 为变电所注入电力系统的 h 次谐波电流,取幅值最大相,A; S_k 为公共连接点(变电所进线)短路容量,MV·A。

在牵引供电系统确定的情况下 $I_h \propto 1/U_N$,则可得 $HRU_h \propto 1/S_k$ 。即牵引站进线电源点谐波电压总畸变率与各次谐波含有率近似与电源点短路容量成反比。

2.4 三相电压不平衡度计算

设进线电源点电力系统等效负序阻抗与正序阻抗相等,负序电流换算为电压不平衡度近似公式为

$$\varepsilon_u = \frac{\sqrt{3}I_2U_L}{S_k} \quad (9)$$

式中, I_2 为负序电流值, A; U_L 为线电压, V; S_k 为公共连接点的短路容量, V·A。

3 高铁牵引供电系统电能质量标准

3.1 谐波分量限值

1) 根据文献[15]规定, 谐波电压限值和谐波电流允许值分别如表2和表3所示。

表2 公用电力系统谐波电压(相电压)限值

电力系统 标称电压/kV	电压总谐波 畸变率(%)	各次谐波电压含有率(%)	
		奇次	偶次
110	2.0	1.6	0.8

表3 注入公共连接点的谐波电流允许值

标准电压 /kV	基准短路容量 /MV·A	谐波次数及电流允许值/A								
		3	5	7	9	11	13	15	17	
110	750	9.6	9.6	6.8	3.2	4.3	3.7	1.9	2.8	

2) 谐波电流限值换算。最小短路容量与基准短路容量不一致时, 对谐波电流允许值按式(10)换算

$$I_h = \frac{S_{k1}}{S_{k2}} I_{hp} \quad (10)$$

式中, S_{k1} 为公共连接点的最小短路容量, MV·A; S_{k2} 为基准短路容量, MV·A; I_{hp} 为表3中 h 次谐波电流允许值, A; I_h 为短路容量为 S_{k1} 时 h 次谐波电流允许值, A。

3) 谐波电流发射限值分配计算。文献[16]考虑负荷的同时性, 规定了用户谐波电流发射限值的具体分配方法, 如式(11)所示

$$I_{hi} = I_h (S_i / F_{HV} S_t)^{1/\alpha} \quad (11)$$

式中, I_{hi} 为第 i 个用户分配的 h 次谐波电流允许值, A; I_h 为短路容量为 S_{k1} 时 h 次谐波电流允许值, A; S_i 为第 i 个用户用电协议容量, MV·A; S_t 为进线电源点供电容量, MV·A; F_{HV} 为同时系数, 典型值在0.4~1.0之间; α 为相位叠加系数, 按表4取值。

表4 叠加系数 α 的值

叠加系数 α	谐波次数
1.0	$h < 5$

(续)

叠加系数 α	谐波次数
1.4	$5 \leq h \leq 10$
2.0	$10 < h$

3.2 负序分量标准

1) 文献[17]规定电力系统公共连接点的正常电压不平衡度允许值为2%, 短时不得超过4%; 接于公共连接点的每个用户引起该点的负序电压不平衡度允许值一般为1.3%, 短时不得超过2.6%。

2) 文献[18]规定发电机在不平衡系统中连续运行时, 各相电流均不超过发电机的额定电流, 且负序电流(I_2)与额定电流(I_N)之比不超过表5所规定数值。

表5 发电机不平衡运行时负序电流限值

发电机型式		I_2/I_N 最大值
凸极电机	间接冷却	8%
	直接冷却	5%
圆柱形转子 同步电机	间接冷却	10%
	≤350 MV·A	8%
	350~1 250 MV·A	$0.08 - [(S_N - 350)/(3 \times 10^4)]$
	≥1 600 MV·A	5%

4 高铁牵引供电系统电能质量仿真评估

4.1 应用实例

以某地区高铁牵引站为研究对象, 其区域电网拓扑结构如图5所示, 节点1~10为330 kV变电站, 节点11为750 kV变电站。发电厂1~6通过双回330 kV线路接入系统; 牵引站A、B通过节点1和节点11接入系统。

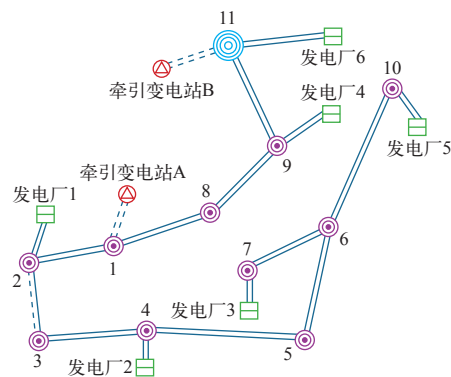


图5 区域电网拓扑

本文计算基于系统最小运行方式，考虑到系统最小运行方式下提供的短路容量较小，对谐波和负序的影响承受力低，与大方式相比对电能质量的要求更严格。电力机车采用CHR2动车组牵引工况下的95%谐波特性统计数据，牵引变压器采用V/V接线，供电方式采用AT供电方式，分析评估流程如图6所示。

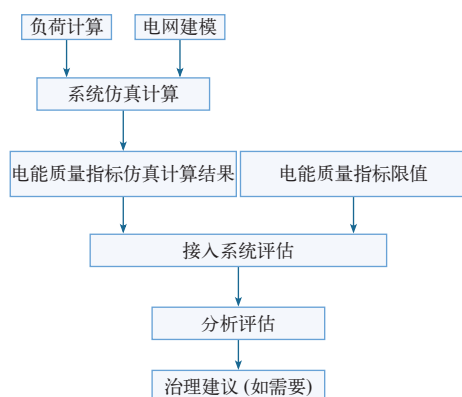


图6 分析评估流程

4.2 谐波电流与谐波电压评估

考虑牵引负荷的随机性和供电臂谐波叠加性，评估谐波时取机车运行的极端工况，即供电臂两侧电流计算取短时最大电流。谐波电流计算结果如图7、图8所示，根据计算结果可知牵引站A、B注入系统的5、7、9、11、13和15次谐波电流均满足标准要求，而3次谐波电流普遍存在超标问题。

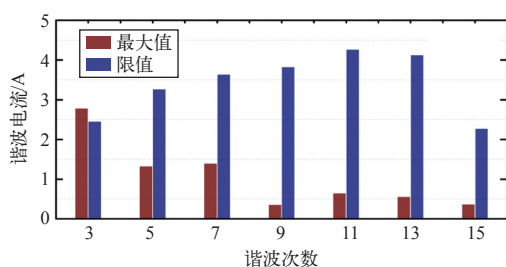


图7 牵引站A注入系统的谐波电流值和允许值

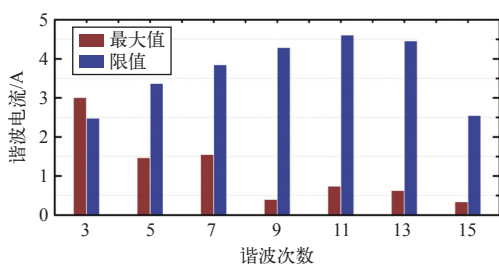


图8 牵引站B注入系统的谐波电流值和允许值

谐波电压畸变率和总电压畸变率计算结果如表6所示。

表6 节点1和节点11谐波电压畸变率

谐波次数	限值 (%)	节点1谐波电压畸变率 (%)	节点11谐波电压畸变率 (%)
3	1.6	0.027	0.026
5	1.6	0.021	0.021
7	1.6	0.031	0.029
9	1.6	0.011	0.010
11	1.6	0.023	0.023
13	1.6	0.023	0.023
15	1.6	0.017	0.014
THD _u	2.0	0.058	0.055

由表6计算结果可见：节点1和节点11的母线电压总畸变率满足小于2%的限值要求，各奇次谐波电压畸变率也都未超过1.6%的要求。

4.3 负序电流和三相电压不平衡度评估

根据牵引供电系统两臂牵引负荷的运行状态，以及V/V接线牵引变压器负序电流分析，考虑以下六种运行方式：①两臂均为平均有效电流；②左臂为平均有效电流，右臂为最大电流值；③两臂均为最大电流值；④左臂为最大电流值，右臂为平均有效电流值；⑤左臂空载，右臂为最大电流值；⑥右臂空载，左臂为最大电流值。

表7和表8分别为牵引站A、B接入系统后区域变电站母线三相电压不平衡度，由计算结果可见六种运行方式下，供电母线三相电压不平衡度均在合格范围内。

表7 牵引站A接入区域变电站三相电压不平衡度(%)

变电站	三相电压不平衡度					
	方式1	方式2	方式3	方式4	方式5	方式6
节点1	0.13	0.26	0.28	0.25	0.29	0.28
节点2	0.12	0.22	0.23	0.21	0.26	0.25
节点3	0.09	0.16	0.18	0.15	0.19	0.18
节点4	0.07	0.13	0.15	0.14	0.16	0.15
节点5	0.06	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13
节点8	0.10	0.19	0.21	0.20	0.23	0.22
节点9	0.07	0.12	0.14	0.13	0.15	0.14

表9和表10的计算结果表明，牵引站A、B对附近发电厂的负序电流影响基本在标准范围内；但与牵引站电气距离较近的部分发电厂，负序电流

占额定电流的百分数较大, 总之负序电流问题不严重, 与理论分析基本一致。

表8 牵引站B接入区域变电站三相电压不平衡度 (%)

变电站	三相电压不平衡度					
	方式1	方式2	方式3	方式4	方式5	方式6
节点5	0.07	0.14	0.15	0.13	0.16	0.17
节点6	0.07	0.15	0.16	0.14	0.17	0.18
节点8	0.07	0.15	0.16	0.14	0.17	0.18
节点9	0.09	0.19	0.21	0.16	0.22	0.23
节点11	0.12	0.25	0.28	0.22	0.29	0.29

表9 牵引站A接入区域发电厂负序电流百分数 (%)

发电厂	I_2/I_N					
	方式1	方式2	方式3	方式4	方式5	方式6
1	0.41	0.81	0.87	0.84	0.93	0.95
2	0.42	0.82	0.92	0.83	0.94	0.96
3	0.37	0.69	0.76	0.72	0.82	0.81
4	0.24	0.46	0.51	0.48	0.52	0.54
5	0.15	0.31	0.34	0.33	0.35	0.37
6	0.13	0.26	0.28	0.27	0.29	0.31

表10 牵引站B接入区域发电厂负序电流百分数 (%)

发电厂	I_2/I_N					
	方式1	方式2	方式3	方式4	方式5	方式6
1	0.22	0.43	0.47	0.41	0.49	0.51
2	0.35	0.73	0.84	0.74	0.89	0.91
3	0.44	0.97	1.03	0.96	1.09	1.12
4	0.19	0.41	0.44	0.42	0.47	0.48
5	0.21	0.42	0.45	0.41	0.48	0.49
6	0.23	0.51	0.56	0.52	0.58	0.61

5 结束语

1) 本文通过理论分析介绍了牵引供电系统的电能质量问题, 以某实际高铁牵引供电系统为例, 基于PSASP进行了仿真计算, 得出高铁牵引供电系统的谐波、负序问题的具体影响程度。通过计算数据和理论分析的比较, 证明分析评估方法的有效性。

2) 按照文献[15]规定的谐波电压和谐波电流双重考核标准, 评估的两个牵引站谐波电流均不符合标准要求; 而谐波电压畸变率相比标准低很多, 这主要由于强大的330 kV电力系统支持。

3) 高铁牵引供电系统接入电压等级高, 与区

域发电厂的电气距离近, 评估时应重点考虑负序分量对区域旋转电机的影响; 牵引负荷运行方式不同, 负序分量影响也不同, 运行时应尽量保持供电两臂负荷平衡, 减小区域电网负序分量的影响。

4) 根据实例仿真计算结果, 提出如下建议:

①高铁牵引供电系统并网后普遍存在3次谐波电流超标问题, 建议牵引站内加装滤波装置; ②三相电压不平衡度和负序电流虽未超出标准要求, 但在距离牵引站电气距离较近的发电厂侧存在负序电流偏高的情况, 建议在发电机组处安装负序电流监测装置。

参考文献

- [1] 周胜军, 于坤山, 冯满盈, 等. 电气化铁路供电电能质量测试主要结果分析 [J]. 电网技术, 2009, 33 (13): 54-57.
- [2] 何正友, 胡海涛, 方雷, 等. 高铁牵引供电系统谐波及其传输特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (16): 59-60.
- [3] George J Wakileh. 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.
- [4] 程浩忠, 艾芊, 张志刚, 等. 电能质量 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [5] 贾善杰, 赵义术, 宫兵, 等. 胶济线电气化铁路对山东电网电能质量的影响 [J]. 电网技术, 2006, 30 (增刊): 11-16.
- [6] 张振安, 李文臣, 王洋, 等. 电气化铁路三相电压不平衡分析算法研究 [J]. 电网与清洁能源, 2012, 28 (5): 14-18.
- [7] 刘鹏, 金庆忍, 邓俊杰, 等. 三相V/V接线牵引变压器供电系统的电能质量问题 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2015, 48 (1): 93-96.
- [8] 解绍锋, 李群湛, 赵丽平. 谐波国家标准有关问题的探讨 [J]. 电网技术, 2006, 30 (13): 94-97.
- [9] 杜晨红, 朱永强, 肖湘宁. 电气化铁道谐波标准有关问题的研讨 [J]. 电气应用, 2009, 28 (15): 62-65.

(下转第73页)

故障,提出预警,避免发生严重事故。

5 结束语

本文构建了基于IEC 61850的变电站一体化监测装置主IED信息建模,解决了目前变电站内主要设备信息模型的缺乏问题,在此基础上研制出实物设备,应用效果良好。

相比传统的IED,本文研制的一体化监测装置主IED通过并行组网方式进行信息交互,可以有效可靠实现对变电站设备的状态监测、预警和故障诊断等功能。

然而变电站设备种类多,故障模式多样化,数据多源异构,如何确保一体化监测装置主IED数据的可靠性和故障诊断的正确率是后续需要解决的问题。

参考文献

- [1] 杨成月. 基于物联网与空间信息技术的电网应急指挥系统[J]. 电网技术, 2013 (6): 1632-1638.
- [2] 周国亮, 朱永利, 王桂兰, 等. 实时大数据处理技术在状态监测领域中的应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29 (增刊1): 432-437.
- [3] 刘巍, 黄昱, 李鹏, 等. 面向智能配电网的大数据统一支撑平台体系与构架[J]. 电工技术学报, 2014, 29 (增刊1): 486-491.
- [4] 张丹丹, 胡建明, 崔婷, 等. 带传感器的射频识别技术在变电站电气设备状态信息采集中的应用[J]. 高电压技术, 2013, 39 (11): 2623-2630.
- [5] 韩法玲, 黄润长, 张华, 等. 基于IEC61850标准的IED建模分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (19): 219-222.
- [6] IEC. Communication networks and systems for power utility automation: part 7-3 basic communication structure common data classes [S]. 2010.
- [7] IEC. Communication networks and systems for power utility automation: part 7-4 basic communication structure compatible logical node classes and data object classes [S]. 2010.
- [8] 任雁铭, 操丰梅, 张军, 等. IEC 61850 Ed 2.0 技术分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (3): 1-5, 53.
- [9] 王德文, 王艳, 邸剑. 智能变电站状态监测系统的设计方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (18): 51-56.
- [10] 王浩中, 张英梅, 汪文全, 等. 基于多链路透明协议技术的智能变电站过程层组网研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15 (9): 193-197.
- [11] 李群湛, 连级三, 高仕斌. 高铁电气化工程[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.
- [12] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
- [13] 王金浩, 薛磊, 李蒙赞, 等. 不同牵引变压器接线方式的应用研究[J]. 现代电力, 2009, 26 (1): 33-39.
- [14] 李群湛. 我国高铁牵引供电发展的若干关键技术问题[J]. 铁道学报, 2010, 32 (4): 119-124.
- [15] GB/T 14549—1993 电能质量公用电网谐波[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [16] IEC 61000-3-6 Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power system [S]. IEC, 1996.
- [17] GB/T 15543—2008 电能质量三相电压不平衡[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [18] GB 755—2008 旋转电机定额和性能[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

(收稿日期: 2017-12-13) **EA**

(收稿日期: 2018-06-28) **EA**