

交-直-交电力机车接入的牵引供电系统电压波动特性

张桂南, 刘志刚, 向 川, 姚书龙

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 针对交-直-交电力机车接入牵引供电系统引发电压不稳、机车牵引封锁的现象, 通过理论推导证明了该现象并非低频振荡而是电能质量问题。采用调制理论分析了低频调制信号在整流器中传播产生对称频率成分的机理; 使用离散傅里叶变换分析了电压的不稳定特性, 并采用总体最小二乘法-旋转不变技术的信号参数估计(TLS-ESPRIT)算法对其主导模态进行辨识, 在此基础上将该现象定位为电压波动问题; 利用不稳定电压的数学描述对信号重构, 通过分析重构信号的多种性能评价指标进一步验证分析的合理性。

关键词: 交-直-交电力机车; 电压波动; 离散傅里叶变换; 对称频率; TLS-ESPRIT 算法; 模态分析; 信号重构

中图分类号: U264.2+2

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.018

0 引言

截至 2015 年, 全国电气化铁路里程为 7.4×10^4 km, 比 2014 年增长 12.9%, 投运的交-直-交型电力机车(HX_D、CRH 型)急剧增多, 车-网系统(电力列车-牵引供电系统)间呈现出更为复杂的电气耦合关系, 导致同一个供电区间内整备的多台电力列车出现牵引封锁^[1-4]。

目前国内外在控制策略改进、稳定性分析以及不稳定电气量模态分析方面开展了相应的前期研究, 普遍认为电气化铁路牵引网不稳定电压中含有低频成分, 是一种低频振荡现象。在电力机车四象限整流器控制策略优化方面, 文献[5]进行多台机车试验发现机车数量及控制系统参数对牵引网低频振荡有很大的影响; 文献[6]通过对车-网模型的仿真研究, 提出调整整流器控制参数或增设功率振荡抑制环节可抑制低频振荡; 文献[7]验证了多变量控制对车-网低频振荡过电压良好的阻尼特性; 文献[8]针对动车组整流器设计了非线性自抗扰控制器, 较好地抑制了振荡电压。在牵引供电车-网电气耦合系统稳定性分析方面, 文献[9]利用小增益定理分析影响牵引网稳定运行的关键因素, 指出通过调节 PI 控制器参数抑制振荡存在局限性; 文献[10]将耦合系统近似为线性时不变系统, 使用一维方法研究了负载输入导纳判据的特性; 文献[11]计及阻抗匹配分析了车-网级联系统的稳定性; 文献[3]对国内低频振荡现象进行详细的统计整理, 采用单相 dq 分解法分

析了车-网耦合系统的欠阻尼机制。

上述研究取得了一定的成果, 然而其都是从低频振荡角度出发研究牵引网电气量不稳定问题, 均未明确给出低频振荡的物理解释。电力系统中低频振荡问题主要表征为扰动下发电机转子间的相互摇摆, 在缺乏阻尼时引起的持续振荡。目前低频振荡产生机理主要有负阻尼机理^[12]、强迫振荡机理^[13]和混沌理论^[14]。文献[15]通过研究电网链式分布、区域间功率不平衡等对电力系统低频振荡进行阻尼影响分析。考虑到牵引供电系统拓扑结构的特殊性、负载的随机性及非线性, 与上述理论分析的对象、产生过程及数学建模均存在差异, 故将其归结为低频振荡问题, 但从抑制低频振荡的角度进行研究并不准确; 上述研究仅针对同一型号、同种工况下电力列车引发的电压不稳定问题进行分析, 并不具备普适性。因此, 深入挖掘牵引网实际监测数据的隐含信息, 准确定位该现象特征对维护高速铁路牵引供电系统的安全稳定运行具有非常重要的实际工程意义。

本文首先通过调制理论分析了不稳定电压的传播特性; 然后分别从时频分析、谱估计及信号重构的角度分析了牵引变电站内部中压评估点的电压录波数据信息, 研究了电压的时变特性和不稳定波动的细节, 并得出了多车整备工况下车-网耦合系统发生的并非是低频振荡、而是电能质量中电压波动与闪变问题的结论; 研究结果显示本文的理论分析结果与实测分析结果具有高度一致性。

1 电气化铁路电压不稳定传播机理分析

1.1 电气化铁路电气量不稳定现象描述

以发生电气量不稳定现象的某供电段的北变电所为例, 其电源条件在我国电气化铁路中处于中等水平, 能满足枢纽的供电需求, 但在目前的供电方案中二次侧两相负荷均衡性较差。据统计, 枢纽内机务

收稿日期: 2016-07-23; 修回日期: 2017-10-19

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(U1434203); 国家自然科学基金资助项目(51377136); 四川省青年科技创新团队项目(2016TD0012)

Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(U1434203), the National Natural Science Foundation of China(51377136) and the Youth Science and Technology Innovation Team Funding of Sichuan Province(2016TD0012)

段、折返段、所有货运到发场及客车整备线均由 b 相供电, b 相平均负荷达到 a 相的 3 倍以上。

现场运行中为满足实际运量的需求, 在同一供电区段的开闭所内需对多台机车进行空载整备(空载整备时机车仅处于整流状态, 逆变器和牵引电机均未进入工作状态)^[1-3]。当 HX_D 型机车超过一定数目时, 牵引网电压、电流在不同时间段会出现不同程度的不稳定状况, 有功、无功功率会出现周期性吞吐变化, 受影响的电力列车会触发整流器保护逻辑, 封锁整流器触发脉冲, 大量的机车会失去牵引能力, 严重时直接导致牵引变电所内断路器跳闸。

图 1 为该牵引变电所主接线及信息量采集示意图。图中 T_1 、 T_2 为接触线, F_1 、 F_2 为馈线。本文主要分析的牵引变电站内部中压评估点电压录波数据由电压互感器采得, 电气量采集位置如图 1 中虚框所示。为了更为清晰地反映电气量的峰值变化趋势, 本文给出牵引网侧电流局部波形, 如图 2 所示。

图 2 表明当多台电力机车整备状态下同时升弓上电时, 空载电流表现出同步性的不稳定, 最终导致网流呈现 2.17 Hz 波动, 与之类似, 网压也出现相应

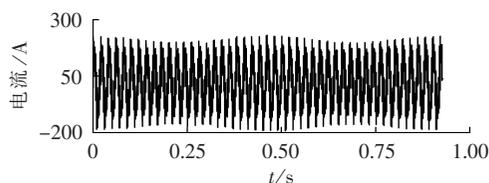


图 2 牵引网侧电流局部波形

Fig.2 Local waveform of traction grid-side current

变化。结合文献[1-4]提供的分析数据以及测试报告可知: 同工况、同型号电力列车接入牵引网引发的网压不稳定规律及频率均具有相似性。

1.2 调制信号在整流器中传播机理分析

整流器中间直流环节电压由于受到低次频率信号的调制作用, 因而可将电力机车整流器的输出电压表达为:

$$u_r = U_{dc} + \sum_k U_{kr} \cos(\omega_k t + \varphi_{kr}) \quad (1)$$

其中, U_{kr} 和 φ_{kr} 分别为整流器输出调制信号电压的幅值和相位, $k=1, 2, 3, \dots$; U_{dc} 为整流器输出电压中的直流电压分量。

该供电区内运行的 HX_D 型电力机车均由 2 节

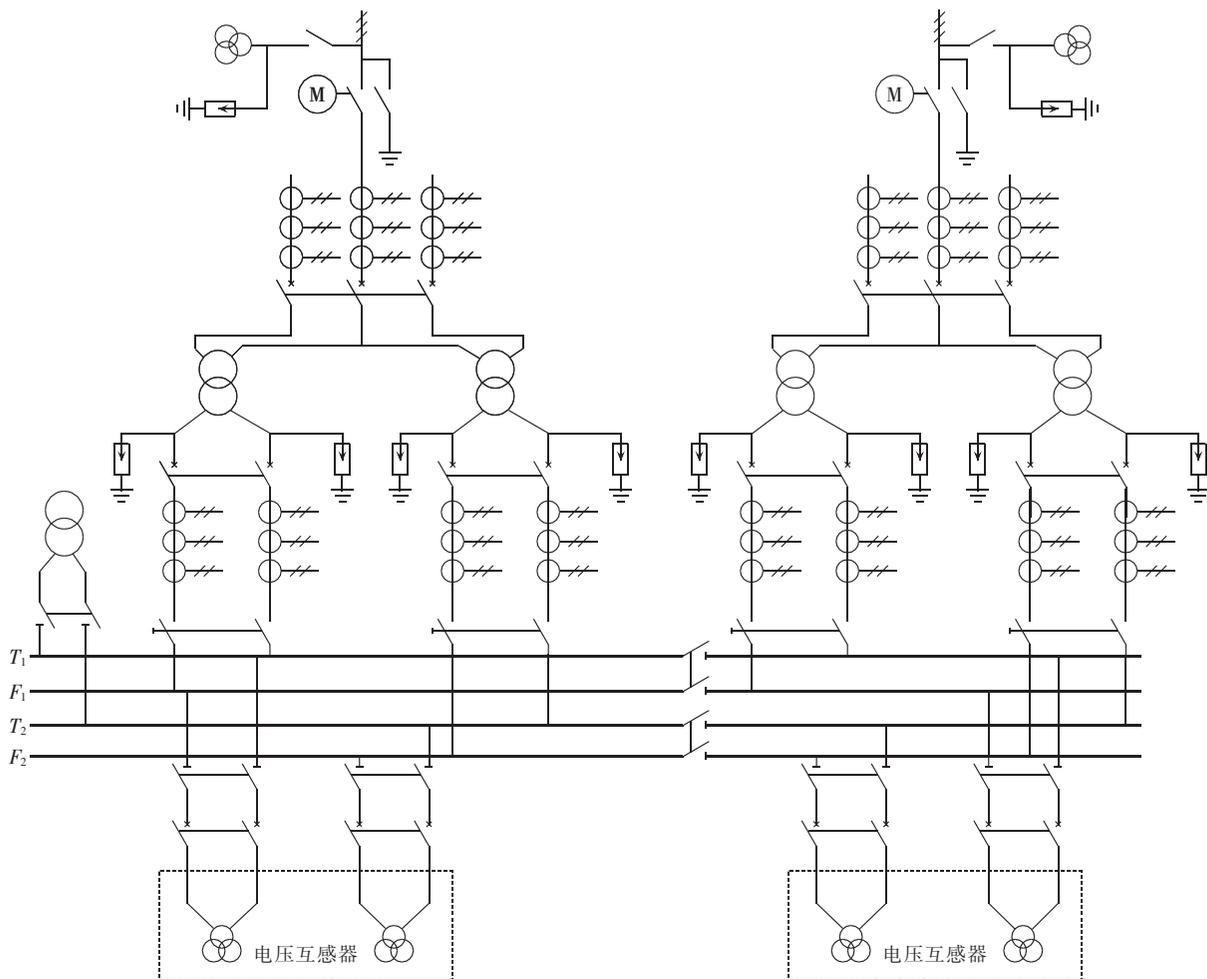


图 1 牵引变电所主接线及信息量采集示意图

Fig.1 Schematic diagram of main connection and information collection for traction substation

机车构成,每节机车有一套牵引传动系统,该系统由拥有 1 个原边绕组和 4 个牵引绕组的主变压器通过两重化的脉宽调制(PWM)四象限脉冲整流器(4QC)向中间直流环节供电;连接在 2 个中间直流环节中的 PWM 逆变器向每台转向架上的 2 个三相异步电机供电。考虑到分析对象 HX_D 型电力机车使用多重化四象限整流器,其单个模块均为单相两电平脉冲整流器电路,因此分析调制信号的传播机理时,研究对象为单相两电平脉冲整流器,其主电路如图 3 所示。图中, u_{ab} 为输入端电压; L_N 和 R_N 分别为牵引绕组漏电感和电阻;开关管 $V_{T1} \sim V_{T4}$ 组成一个全控桥电路; L_2 和 C_2 组成一个二次滤波器; C_d 为中间直流侧支撑电容; R 为电力机车牵引传动系统的逆变器、牵引电机部分的简化等效电阻^[4,7-9,11]。

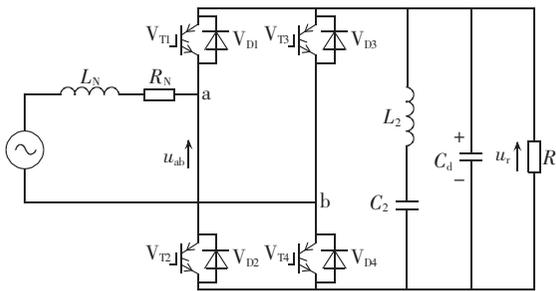


图 3 单相两电平脉冲整流器主电路
Fig.3 Main circuitry of single-phase two-level pulse rectifier

直流侧电压 u_r 穿越机车整流器的过程可看作整流开关函数对直流侧电压 u_r 的调制过程。本文以机车变流器的两电平整流为例,该模块通常由 4 个绝缘栅双极型晶体管(IGBT)构成,任意时刻均有 2 个 IGBT 同时导通,采用双极性正弦脉宽调制(SPWM)算法,调制载波比为 4.0,两电平脉冲整流开关函数 S 如图 4 所示^[16]。

为便于分析,定义理想开关函数 S_a 和 S_b 并忽略

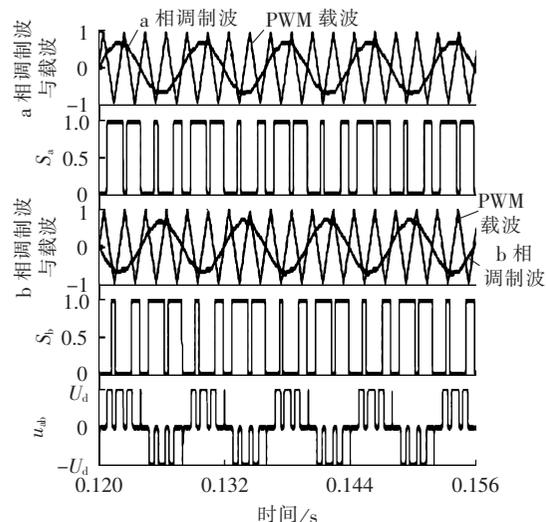


图 4 网侧牵引变流器开关函数

Fig.4 Switching function of grid-side traction converter

牵引绕组电阻,由于上桥臂与下桥臂不允许直通,则在每相桥臂中,上桥臂的开关信号必须与下桥臂的开关信号相反。结合图 4 可知,输入端电压 u_{ab} 的取值有 $U_d, 0, -U_d$ 3 种电平,有效的开关组合有 $2^2=4$ 种,即 S_{ab} 有 00、01、10、11 共 4 种逻辑;当调制波电压大于载波电压时, S_a 为 1,否则为 0。 b 相与 a 相调制方式相同,但 b 相调制波与 a 相调制波相位相差 180° 。本文分析的变流器开关函数为^[17]:

$$S(t) = S_a - S_b = \sum_{n=1,3,5,\dots} \left[\frac{4J_n \left(np\varepsilon \frac{M\pi}{2} \right)}{np\varepsilon\pi} \times \sin \left(n\omega_m t - \frac{np\varepsilon\pi}{2} \right) \right] + \sum_{m=2,4,6,\dots} \sum_{n=\pm 1, \pm 3, \dots} \left\{ 4C_{mn} \times (-1)^{\frac{m}{2}} \times \sin \left[(m\omega_c t + n\omega_m t) - \left(m\pi + \frac{np\varepsilon\pi}{2} \right) \right] \right\}$$

$$C_{mn} = J_n \left[(m + n\varepsilon p) M \pi / 2 \right] / (m\pi + n\varepsilon p \pi)$$

$$J_n(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-jx \sin y} e^{jn y} dy$$

其中, $J_n(x)$ 为贝塞尔函数, n 为贝塞尔函数的阶数; ω_m 为调制信号角频率; ω_c 为载波信号角频率; p 为调制波与载波频率比例系数(载波比的倒数); ε 为采样系数,一般取值为 0~1; M 为调制系数,其取值范围为 0~1。

忽略谐波间的相互影响,则式(2)可简化为:

$$S(t) \approx \sum_{n=1,3,5,\dots} b_n \cos(n\omega_m t - \varphi_n) \quad (3)$$

其中, $b_n = 4J_n \left(np\varepsilon \frac{M\pi}{2} \right) / (np\varepsilon\pi)$; $\varphi_n = \frac{np\varepsilon + 1}{2} \pi$ 。

根据开关函数调制理论, u_{ab} 可表示为:

$$u_{ab} = S(t) u_r \quad (4)$$

将式(1)和(2)代入式(4)可得:

$$u_{ab} = S(t) \left[U_{dc} + \sum_k U_{kr} \cos(\omega_k t + \varphi_{kr}) \right] = \sum_{n=1,3,5,\dots} b_n \cos(n\omega_m t - \varphi_n) \left[U_{dc} + \sum_k U_{kr} \cos(\omega_k t + \varphi_{kr}) \right] = U_{dc} \left[b_1 \cos(\omega_m t - \varphi_1) + b_3 \cos(3\omega_m t - \varphi_3) + b_5 \cos(5\omega_m t - \varphi_5) + \dots \right] + \frac{U_{kr} b_1}{2} \left[\sum_k \cos(\omega_m t + \omega_k t - \varphi_1 + \varphi_{kr}) + \sum_k \cos(\omega_m t - \omega_k t - \varphi_1 - \varphi_{kr}) \right] + \frac{U_{kr} b_3}{2} \left[\sum_k \cos(3\omega_m t + \omega_k t - \varphi_3 + \varphi_{kr}) + \sum_k \cos(3\omega_m t - \omega_k t - \varphi_3 - \varphi_{kr}) \right] + \dots \quad (5)$$

式(5)为牵引供电系统侧调制电压的表达式,其可以准确地反映牵引供电系统侧电压受到调制的频谱特征。上式中第 2 个等号右边第 1 项为基波和一系列特征谐波之和,其是整流开关函数对整流器输出电压中直流电压分量 U_{dc} 的调制结果,特征谐波的频率满足 $2v \pm 1$ ($v=1, 2, \dots$) 的关系;第 2、3、...项为一系列电压调制波之和,其是整流开关函数对整流器输出调制波电压的调制结果。式(5)表明,对于

频率为 f_k 的直流电压波动分量, 其会在基波和各特征谐波附近引起等幅成对的频率成分, 即 $nf_m \pm f_k$; 随着特征谐波次数、幅值的变化, 调制波幅值随之变化。考虑到牵引网电压以工频为主, 因此对工频作用的调制信号主导影响了网压幅值的不稳定。

2 电气化铁路电压不稳定特性及模态分析

2.1 电气化铁路电压不稳定特性分析

为保证电气量不稳定程度分析的全面性, 相关测试单位在整备库线仅选定一台 HX_D 型电力机车升弓进行电压在线测试, 其他电力机车均处于正常的牵引、制动状态。截取测试当日时间段 14:20:15—14:21:15 某牵引变电站内部中压评估点电压录波数据进行特征分析, 如图 5 所示。

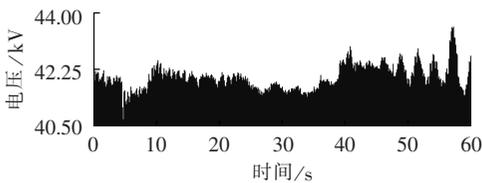
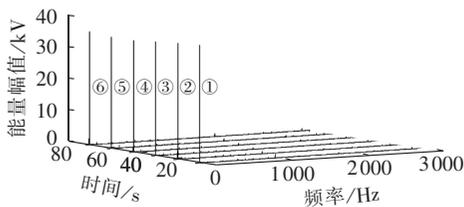


图 5 电压波形

Fig.5 Waveform of voltage

由图 5 可知, 该时间段内牵引网电压存在稳定、一般波动及剧烈波动等情况, 能够较为完整地反映多台电力机车在空载、牵引时各种实际的运行状况。为定量评价该时间段内电压不稳定的程度, 本文对上述数据使用离散傅里叶变换 (DFT) 对多个相邻时间段内电压数据进行频域分析, 结果如图 6 所示。



- ① 第 1 个时间段, ② 第 2 个时间段
③ 第 3 个时间段, ④ 第 4 个时间段
⑤ 第 5 个时间段, ⑥ 第 6 个时间段

图 6 相邻时间段牵引网侧电压频谱分析

Fig.6 Spectrum analysis of traction grid-side voltage in adjacent time period

由图 6 可看出, 基频附近存在明显的对称频率成分, 约为 48 Hz、52 Hz, 结合电压实测波形发现该频率成分的能量幅值越大, 牵引网电压的不稳定程度越剧烈; 6 个时间段内均存在 59、61 次等主要高频谐波成分, 59 次谐波能量幅值稍高, 且各高次谐波两侧也存在相应的对称频率成分。为清晰地反映基波、59 次谐波主导频率及其两侧对称频率能量幅值分布情况, 对其进行统计, 结果如表 1 所示。

从表 1 可看出, 6 个时间段内 59 次谐波附近均存在对称频率成分。结合图 6, 考虑到该谐波能量幅

表 1 各时间段主导频率能量幅值分布

Table 1 Energy amplitude distribution of dominant frequency in all time periods

时间段	能量幅值/kV					
	47.92 Hz	50 Hz	52.16 Hz	2948 Hz	2950 Hz	2952 Hz
1	0.352	36.61	0.231	0.285	0.581	0.397
2	0.514	33.89	0.847	0.203	0.357	0.254
3	0.341	37.21	0.253	0.185	0.451	0.203
4	0.326	36.81	0.239	0.113	0.327	0.184
5	0.368	35.93	0.210	0.071	0.682	0.195
6	1.546	33.61	3.231	0.148	0.647	0.154

值没有明显变化, 然而电压却存在稳定、不稳定以及不稳定加剧的状态, 表明各时间段内电压不稳定程度与该高频成分无关; 与之相反, 基频附近的对称频率却较好地表征了电压不稳定的剧烈程度。为此, 本文对多车空载整备状态下的牵引网电压不稳定被定位为低频振荡现象提出不同的观点。

考虑到 DFT 在频谱分析结果中存在的伪频率成分以及频谱泄漏的缺陷, 为了更好地验证上述分析结果并给出合理的定位, 下文采用基于量测的低频振荡分析方法进行模态分析。

2.2 不稳定电气量模态分析

在量测分析方法中, 针对暂态振荡信号, Prony 及其改进方法是应用最多的方法^[18-22], 然而 Prony 方法对噪声较为敏感, 当阶数选择不恰当时辨识结果偏差较大; 总体最小二乘法-旋转不变技术的信号参数估计 TLS-ESPRIT (Total Least Square-Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) 算法^[23-25]具有出色的抗噪性能, 因此本文选取该算法对牵引网电压的不稳定模式进行辨识。

使用 TLS-ESPRIT 算法时, 输入信号为多车接入牵引供电系统时的电压信号, 可表示为一系列复指数函数与噪声的叠加, 如式 (6) 所示。

$$u(z_1) = \sum_{i=1}^q A_i e^{j\theta_i} e^{(\alpha_i + j\omega_i)z_1 T_s} + w(z_1) = \sum_{i=1}^q b_i Z_i + w(z_1) \quad (6)$$

其中, α_i 、 ω_i 、 A_i 、 θ_i 分别为第 i 模式的衰减系数、角频率、振荡幅值、初相位; T_s 为信号的采样周期; q 为信号阶数, 一般为实际正弦分量个数的 2 倍; $w(z_1)$ 为白噪声; $Z_i = e^{(\alpha_i + j\omega_i)z_1 T_s}$ 为该信号的极点。TLS-ESPRIT 算法可由构造观测数据自相关和互相关矩阵进行特征值、奇异值分解来实现^[23]。辨识电压不稳定模式频率和阻尼比步骤如下。

a. 根据系统输入数据 $u(z_1)$ 构造 Hankel 矩阵 X 。

$$X = [X(0) \ X(1) \ \cdots \ X(L-1)]^T =$$

$$\begin{bmatrix} u(0) & u(1) & \cdots & u(M_0-1) \\ u(1) & u(2) & \cdots & u(M_0) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u(L-1) & u(L) & \cdots & u(N_0-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, N_0 为输入数据的个数, $M_0 = N_0/2$, $L = N_0 - M_0 + 1$ 。

b. 对 X 进行奇异值分解。

$$X = U \Sigma V^T \quad (8)$$

其中, Σ 为 $L \times N_0$ 阶的对角阵, 其对角元素为矩阵 X 的奇异值, 且奇异值呈递减排列; 酉矩阵 U 为左奇异向量; 酉矩阵 V 为右奇异向量。

c. 确定信号子空间阶数 q 。

从对角阵 Σ 中的元素中找出满足式(9)的最小整数 z , 取信号阶数 $q = z$ 。

$$\begin{cases} \xi_z / \xi_1 \geq K_c \\ \xi_{z+1} / \xi_1 < K_c \end{cases} \quad (9)$$

其中, ξ_1, ξ_z, ξ_{z+1} 为对角阵 Σ 中的元素。本文中 K_c 取值为 0.01。当阶数 q 确定后, 式(8)为:

$$X = U \Sigma V^T = [U_s \quad U_n] \begin{bmatrix} \Sigma_s & 0 \\ 0 & \Sigma_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s^H \\ V_n^H \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, Σ_s 为矩阵 X 幅值最大的 q 个奇异值组成的对角阵, Σ_n 为剩余的奇异值组成的对角阵。将酉矩阵 V 按奇异值的大小划分为信号子空间 V_s 和噪声子空间 V_n , V_s 的列向量对应于矩阵 X 的幅值最大的 q 个奇异值的奇异向量, 相应地, 将酉矩阵 U 按奇异值大小可划分为 U_s, U_n 。

d. 构造矩阵 $[V_1 \quad V_2]$, 并对其进行奇异值分解。

$$[V_1 \quad V_2] = \bar{U} \bar{\Sigma} \bar{V}^T \quad (11)$$

其中, V_1 为去除 V_s 最后一行得到的矩阵; V_2 为去除 V_s 第一行得到的矩阵。

e. 将 \bar{V} 分解为 4 个 $q \times q$ 阶的矩阵。

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{11} & \bar{V}_{12} \\ \bar{V}_{21} & \bar{V}_{22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

则总体最小二乘解为 $\psi_{\text{ls}} = -\bar{V}_{12} \bar{V}_{22}^{-1}$ 。

f. 求矩阵 ψ_{ls} 的特征值 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, q)$, 并计算模式的频率和阻尼比。

$$\begin{cases} f_i = \frac{|\arctan[\text{Im}(\lambda_i) / \text{Re}(\lambda_i)]|}{2 \pi \Delta t} \\ \zeta_i = -\frac{\text{Re}(\ln \lambda_i)}{\sqrt{[\text{Re}(\ln \lambda_i)]^2 + [\text{Im}(\ln \lambda_i)]^2}} \end{cases} \quad (13)$$

g. 通过构造矩阵、拟合系数计算模式的幅值和初相位。

h. 主导模式筛选: 经过上述步骤, 针对牵引网电压计算的模式中还是存在幅值很小或者衰减很快的非主导模式分量需要被筛减。本文定义阻尼比大于 0.3 且基准幅值大于 400 V 的模式为牵引网电气量主导模式。

使用 TLS-ESPRIT 算法对图 5 中第 1 个时间段牵引变电所中压评估点电压进行模态分析, 主导频率如表 2 所示。

由表 2 可以看出, 针对实际量测电压数据用

表 2 基于 TLS-ESPRIT 算法的牵引网侧电压的模态分析

Table 2 Mode analysis of traction grid-side voltage based on TLS-ESPRIT algorithm

频率/Hz	衰减因子/(s ⁻¹)	幅值/kV	相位/(°)
50.0	0.100	36.75	3.0
2950	-0.200	0.581	95.2
3050	-0.270	0.509	180.0
52.1	0.100	0.471	117.2
48.0	0.100	0.450	67.7
2952	-5.300	0.380	94.0
2948	-368.2	0.269	115.6

TLS-ESPRIT 算法并未分析出低频主导模式, 显然牵引网电气量不稳定现象并非低频振荡。表 2 中, 基频附近存在明显的对称频率, 与 1.2 节理论推导结果吻合, 并与 2.1 节中 DFT 分析结果基本一致。同理, 对其余 5 个时间段内量测电压进行模态分析, 除高次谐波及其调制信号略有不同外, 基频附近对称频率分布情况没有大的变化。参照 IEC 61000-4-15-1997 及 GB 12326-2008《电能质量电压波动和闪变》^[26-27]: 电网出现负荷剧烈变化, 冲击性负荷投切时, 相关电气量幅值将在 0.9~1.1 p.u. 内间歇性波动, 主要频次附近出现 0.05~35 Hz 的对称频率成分。本文所提及现象的产生条件、主导模式与上述规定有着明显的吻合性; 不同的是高次谐波附近均存在对称频率, 但衰减因子相对较大, 故作用并不明显。据此, 本文将其拓展至牵引供电系统中, 将上述现象定位为电能质量的电压波动问题。

3 牵引网电压波动问题验证

结合 TLS-ESPRIT 算法下的电压波动信号模态分析, 提取相关主导模式幅值、相位, 利用电压波动信号的数学表达式对信号重构, 并与实际信号进行对比验证。

3.1 波动信号数学模型

电压波动可视作为以工频电压额定量为载波信号, 被低频调幅波信号调制的结果。结合式(5)以及表 2, 考虑到本文现象中高次谐波成分也出现被调制现象, 故将电压波动信号表示为:

$$u(t) = \left[1 + \sum_{l=1}^{M_1} m_l \cos(2 \pi f_l t) \right] \times \left[\cos(2 \pi f_0 t + \varphi_0) + \sum_{j=1}^{N_0} m_{h_j} \cos(2 \pi f_{h_j} t + \varphi_{h_j}) \right] \quad (14)$$

其中, f_0 为基波频率; m_l, f_l, φ_l 分别为第 l 个调幅波的相对幅值、频率、相位; $m_{h_j}, f_{h_j}, \varphi_{h_j}$ 分别为第 j 个谐波的相对幅值、频率、相位; M_1 为低频调幅波信号的个数。

为了评价重构信号与实际信号的相似程度, 采用相关系数 γ 进行评价:

$$\gamma = \frac{\sum_{m=1}^{M_2} [u(m) - \bar{u}(m)][\hat{u}(m) - \bar{\hat{u}}(m)]}{\sqrt{\sum_{m=1}^{M_2} [u(m) - \bar{u}(m)]^2 \sum_{m=1}^{M_2} [\hat{u}(m) - \bar{\hat{u}}(m)]^2}} \quad (15)$$

其中, $u(m)$ 和 $\hat{u}(m)$ 分别为原始信号和重构信号; $\bar{u}(m)$ 和 $\bar{\hat{u}}(m)$ 分别为原始信号和重构信号的平均值; M_2 为重构信号的点数。为了更好地验证信号的相似性, 使用重构信噪比 SNR (Signal to Noise Ratio)、均方误差百分值 MSE (Mean Squared Error) 及能量恢复系数 ERP (Energy Recovery Percentage) 指标进行重构性能评价^[28]。计算公式如下:

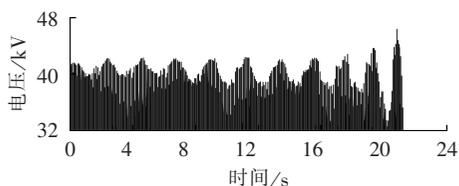
$$\begin{cases} R_{\text{SNR}} = 10 \lg \left[\frac{\sum_{m=1}^{M_2} |u(m)|^2}{\sum_{m=1}^{M_2} |u(m) - \hat{u}(m)|^2} \right] \\ E_{\text{MS}} = \left(\frac{\sqrt{\sum_{m=1}^{M_2} |u(m) - \hat{u}(m)|^2}}{\sqrt{\sum_{m=1}^{M_2} |u(m)|^2}} \right) \times 100\% \\ P_{\text{ER}} = \left(\frac{\sum_{m=1}^{M_2} [\hat{u}(m)]^2}{\sum_{m=1}^{M_2} [u(m)]^2} \right) \times 100\% \end{cases} \quad (16)$$

3.2 电压波动信号重构效果验证

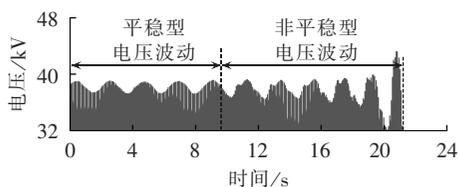
由于低频调制信号在 2 Hz 附近存在微小波动, 本文在计算中暂定低频调制信号为 2 Hz, 取 220 kV 为电压基准值。此外, 由于实际量测结果频域较宽, 为了较好地分析重构信号、实现带通、高通滤波要求, 本文设计五阶 Butterworth 滤波器^[29], 对实际网压信号进行 60~2 800 Hz 的带通滤波和 3 000 Hz 的高通滤波。对稳态波动、非平稳型电压波动情况进行滤波及重构处理后, 电压波动信号的滤波效果如图 7 所示。

图 7 频谱分析表明, 该滤波器能够达到 60~2 800 Hz 的带通滤波和 3 000 Hz 以上高通滤波的要求。由图 7(a)、(b) 可看出, 滤波前后网压峰值变化趋势变化不大, 在 0~9 s 具有基本相似的波动规律, 在 9~21 s 内电压波动幅值逐步增大, 本文将其分别定义为平稳型电压波动与非平稳型电压波动。由图 7(c)、(d) 可以看出, 2 类电压波动在谐波污染上具有相似性, 因而可确定导致电压波动由平稳转向非平稳状态的主导因素并非特征谐波; 平稳型电压波动的基频对称频率为 48.13 Hz 和 51.74 Hz, 与之对应的频谱幅值分别为 1.470 kV、1.483 kV, 满足电压波动数学模型的要求; 非平稳型电压波动频率满足对称性, 但其右侧频率频谱幅值为 3.35 kV 明显比左侧大, 因而可确定显著变化的基频附近对称频率频谱幅值与电压峰值变化趋势具有较强的吻合度, 是影响该状态转变的关键; 非平稳状态的电压波动与传统意义上的电压波动存在一定的差异, 结合图 7 可看出主要是由于对称频率的频谱幅值不等而导致的。

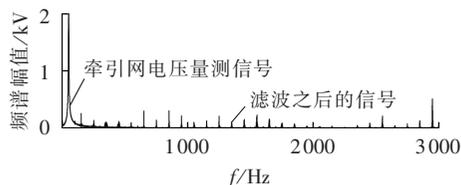
为进一步验证上述分析结果的正确性, 结合



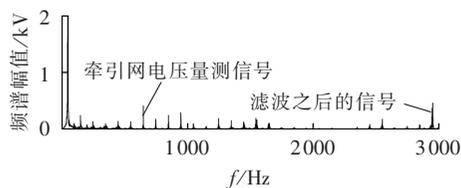
(a) 电压原始量测信号



(b) 滤波之后的信号



(c) 滤波前后平稳型电压波动频谱



(d) 滤波前后非平稳型电压波动频谱

图 7 牵引变电站电压滤波信号及频谱分析

Fig.7 Filter signal and frequency spectrum analysis of traction substation voltage

TLS-ESPRIT 算法下电压波动信号的模式分析, 提取相关主导模式幅值、相位, 利用电压波动信号的数学表达式进行信号重构。电压波动信号的基波频率为 50 Hz, 采样率为 2 kHz, 数据长度为 42 722 点。对于稳定型电压波动, 取观测数为 21 361; 考虑到非稳定型电压波动在较短时间内可视为稳定型电压波动, 对该类信号分 4 段进行重构, 取观测数为 5 340, 重构效果如图 8 所示。为了更好地重构图 7(b) 中非平稳型电压波动, 将其等分为 I 段、II 段、III 段、IV 段进行依次重构。电压波动信号重构性能评价指标如表 3 所示。

从图 8(a)、(b) 中可明显看出, 实际的牵引网网压包络线与使用 TLS-ESPRIT 算法拟合得到的电压包络线具有极大的相似性; 在平稳型电压波动中最大误差仅为 0.125 7 kV, 然而图 8(b) 中最大误差高达 1.312 kV, 主要是由于非平稳阶段对称频率成分更为复杂, 除了本文重构使用的 48、52 Hz 对称频率, 还存在 47.3 Hz 和 52.7 Hz 等频率成分, 本文考虑其衰减因子相对较大对其进行筛减处理。

由表 3 可看出, 稳定型电压波动的 SNR 大于 35

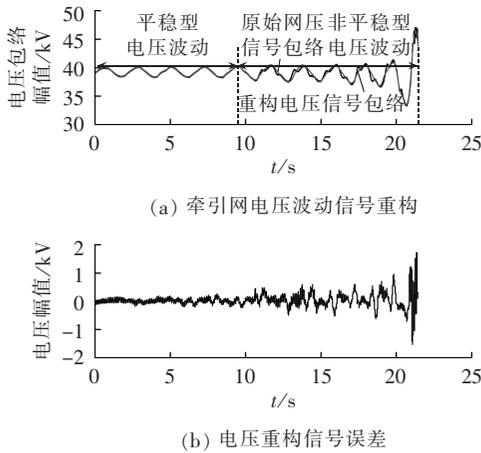


图 8 牵引网侧电压波动重构信号及绝对误差

Fig.8 Reconstruction signal and absolute error of traction grid-side voltage fluctuation

表 3 电压波动信号重构性能评价指标

Table 3 Reconstruction performance evaluation indexes of voltage fluctuation signals

电压波动信号	$\gamma/\%$	R_{SNR}/dB	$E_{MS}/\%$	$P_{ER}/\%$	
平稳型	99.53	44.19	0.62	99.84	
非平稳型	I 段	97.26	35.73	1.31	97.37
	II 段	90.83	33.96	1.84	89.53
	III 段	92.57	30.67	3.92	91.30
	IV 段	93.16	31.10	2.38	92.29

dB, γ 、ERP 大于 99.6%, 保留了原始信号绝大部分的能量, 且 MSE 很小, 重构准确度较高; 对于非稳定型 4 段电压波动, SNR 最小为 30.67 dB, ERP 最小为 89.53%, MSE 最大达到 3.92%, 显然原始信号的波动特征存在一定程度的失真, 但 γ 仍保持在 90.0% 以上, 说明利用电压波动数学表达式重构的结果在一定程度上是可信的。结合上述分析, 将牵引网电气量不稳定现象定义为电能质量电压波动问题具有较大的合理性。

4 讨论

牵引负载的非线性电路接入牵引供电系统后, 耦合作用将会在基波和各特征谐波附近产生等幅成对的频率成分, 使得馈线电压出现低频电压波动, 随着负载的增多波动将加剧, 从而引发列车牵引封锁。既然上述现象为电能质量电压波动问题, 对于列车整流器使用多变量控制、非线性控制策略优化负荷特性能够达到抑制该现象的目的; 在牵引网侧引入补偿设备, 如并联静/动态无功补偿器, 快速调节无功功率, 维持电压的稳定, 理论上也能抑制该现象。

5 结论

针对多车整备下牵引供电系统电气量存在的不稳定现象, 本文采用调制理论分析了调制信号在整流器中的传播机理, 使用 DFT 分析了电压的不稳定

特性, 并在此基础上采用 TLS-ESPRIT 算法对其进行模态分析, 最后利用电压波动的数学表达式对信号进行精确重构, 通过分析得到如下结论。

a. 频率为 f_k 的直流电压波动分量会在基波和各特征谐波附近引起等幅成对的频率成分 $n f_m \pm f_k$; 随着特征谐波次数、幅值变化, 调制波幅值将随之变化, 考虑到牵引网电压以工频为主, 因此对工频作用的调制信号主导影响网压幅值的不稳定。

b. 针对实际量测电压数据, 使用 DFT 及 TLS-ESPRIT 算法初步确定牵引网电气量不稳定现象并非低频振荡问题, 而是电能质量电压波动问题, 并利用 TLS-ESPRIT 算法对其主导模态进行准确辨识。

c. 利用电压波动数学表达式重构的结果与实际信号具有高度相关性, 能够保留原始信号绝大部分的能量, 确定了牵引网电气量不稳定现象被定义为电能质量电压波动问题的合理性。

d. 从车和网 2 个角度出发给出了抑制牵引供电系统电压波动的可行性方法。

参考文献:

- [1] 中国铁道科学研究院, 太原铁路局, 北京交通大学, 等. 大秦线 HX₀1 型机车车网匹配关系测试报告[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2008.
- [2] 中国铁道科学研究院. 南翔开闭所、CRH1067 接触网电压电流测试报告[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2010.
- [3] WANG H, WU M, SUN J. Analysis of low-frequency oscillation in electric railways based on small-signal modeling of vehicle-grid system in dq frame[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(9): 5318-5330.
- [4] DANIELSEN S, FOSSO O B, MOLINAS M, et al. Simplified models of a single-phase power electronic inverter for railway power system stability analysis—development and evaluation[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(2): 204-214.
- [5] MENTH S M, MEYER M. Low frequency power oscillations in electric railway systems[J]. Eb-Elektrische Bahnen, 2006, 104(5): 216-221.
- [6] 王晖, 吴命利. 牵引网低频振荡及其抑制方法的仿真分析[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1088-1095.
WANG Hui, WU Mingli. Simulation analysis on low-frequency oscillation in traction power supply system and its suppression method[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1088-1095.
- [7] HEISING C, OETTMEIER M, STAUDT V, et al. Improvement of low-frequency railway power system stability using an advanced multivariable control concept[C]//The 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Porto, Portugal: IEEE, 2009: 560-565.
- [8] ZHANG Guinan, LIU Zhigang, YAO Shulong, et al. Suppression of low frequency oscillation in traction network of high-speed railway based on auto disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2(2): 244-255.
- [9] 张桂南, 刘志刚, 向川, 等. 高铁车网耦合系统电压低频振荡现象机理研究[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1956-1962.

- ZHANG Guinan, LIU Zhigang, XIANG Chuan, et al. Mechanism on voltage low frequency oscillation of high-speed railway traction network and EMU coupling system[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1956-1962.
- [10] PAICE A D B, MEYER M. Rail network modelling and stability: the input admittance criterion [C]//The 14th International Symposium Mathematics Theory Network System. Perpignan, France: [s.n.], 2000: 1-6.
- [11] LIU Zhigang, ZHANG Guinan, LIAO Yicheng. Stability research of high-speed railway EMUs and traction network cascade system considering impedance matching[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(5): 4315-4326.
- [12] DEMELLO F P. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1969, 88(4): 316-329.
- [13] CHEN Lei, MIN Yong, HU Wei. An energy-based method for location of power system oscillation source[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 828-836.
- [14] 檀斌, 薛禹胜. 多机系统混沌现象的研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(2): 3-8.
TAN Bin, XUE Yusheng. A study on chaos of multi-machine systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2): 3-8.
- [15] WEN-SHOW K. The effect of the low-frequency oscillations damping in Taipower system experience w/wo power system stabilizer[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(3): 463-472.
- [16] 宋文胜, 冯晓云. 一种单相三电平 SVPWM 调制与载波 SPWM 内在联系[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 131-138.
SONG Wensheng, FENG Xiaoyun. Relationship between single phase three-level SVPWM and carrier SPWM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 131-138.
- [17] SHEN J, TAUFUQ J A, MANSELL A D. Analytical solution to harmonic characteristics of traction PWM converters[J]. IEE Proceedings of Electrical Power Application, 1997, 144(2): 379-384.
- [18] HAUER J F, DEMEURE C J, SCHARF L L. Initial results in Prony analysis of power system response signals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(1): 80-89.
- [19] PIRRE D A, TRUDNOWSKI D J, HAUER J F. Identifying linear reduced-order models for systems with arbitrary initial conditions using Prony signal analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 37(6): 831-835.
- [20] 李大虎, 曹一家. 基于模糊滤波和 Prony 算法的低频振荡模式在线辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 14-19.
LI Dahu, CAO Yijia. An online identification method for power system low-frequency oscillation based on fuzzy filtering and Prony algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 14-19.
- [21] 丁蓝, 薛安成, 李津, 等. 基于窗口滑动改进 Prony 算法的电力系统低频振荡识别[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 24-28.
DING Lan, XUE Ancheng, LI Jin, et al. A moving-window Prony algorithm for power system low frequency oscillation identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22): 24-28.
- [22] 王家林, 夏立, 吴正国, 等. 采用改进 Prony 算法的电力系统故障暂态信号分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 89-98.
WANG Jialin, XIA Li, WU Zhengguo, et al. Analysis of power system transient signal based on improved Prony algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 89-98.
- [23] 张静, 徐政, 王峰, 等. TLS-ESPRIT 算法在低频振荡分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 84-88.
ZHANG Jing, XU Zheng, WANG Feng, et al. TLS-ESPRIT based method for low frequency oscillation analysis in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 84-88.
- [24] 张滨生, 俞乐, 和敬涵, 等. 基于快速 TLS-ESPRIT 的间谐波检测算法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 26-31.
ZHANG Binsheng, YU Le, HE Jinghan, et al. Inter-harmonic detection based on fast TLS-ESPRIT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 26-31.
- [25] 曾正, 赵荣祥, 杨欢. 基于奇异熵 TLS-ESPRIT 算法的微电网小信号稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 7-12.
ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, YANG Huan. Small signal stability analysis based on singular entropy and TLS-ESPRIT algorithm for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 7-12.
- [26] International Electrotechnical Commission. ElectroMagnetic Compatibility(EMC)-part 4:testing and measurement techniques section 15:flickermeter-functional and design specifications; IEC 61000-4-15-1997[S]. [S.l.]: European Committee for Electrotechnical Standardization, 1997.
- [27] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量电压波动和闪变: GB/T 12326—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [28] 王学伟, 王琳, 苗桂君, 等. 暂态和短时电能质量扰动信号压缩采样与重构方法[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 191-196.
WANG Xuewei, WANG Lin, MIAO Guijun, et al. An approach for compressive sampling and reconstruction of transient and short-time power quality disturbance signals[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 191-196.
- [29] 刘正士, 汪小龙, 王勇, 等. 双线性变换中的频率失真[J]. 振动工程学报, 2002, 15(1): 102-105.
LIU Zhengshi, WANG Xiaolong, WANG Yong, et al. Frequency infidelity of bi-linear transform[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(1): 102-105.

作者简介:



张桂南

张桂南(1988—),男,黑龙江克东人,助理研究员,博士,研究方向为高速铁路车网耦合系统稳定性分析(E-mail: zgn_2008@126.com);

刘志刚(1975—),男,河南巩义人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为现代信号处理及其在电力系统和牵引供电系统中的应用(E-mail: liuzg_cd@126.com);

向川(1991—),男,云南昆明人,硕士研究生,研究方向为高速铁路车网系统的建模与分析(E-mail: 1091930966@qq.com);

姚书龙(1991—),男,甘肃陇南人,硕士研究生,研究方向为现代信号处理在牵引供电系统中的应用(E-mail: 574985130@qq.com)。

(下转第 136 页 continued on page 136)

- [15] HABEN S, SINGLETON C, GRINDROD P. Analysis and clustering of residential customers energy behavioral demand using smart meter data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(1): 136-144.
- [16] 李鹏, 徐伟娜, 周泽远, 等. 基于改进万有引力搜索算法的微网优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3073-3079.
- LI Peng, XU Weina, ZHOU Zeyuan, et al. Optimal operation of microgrid based on improved gravitational search algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3073-3079.

作者简介:



苏 适

苏 适(1972—),男,云南昆明人,高级工程师,硕士,研究方向为新能源与智能电网(E-mail:sushil@sina.com);

李康平(1992—),男,浙江海宁人,硕士研究生,研究方向为电力系统负荷特性分析、需求侧响应等(E-mail:lkpncepu@sina.com)。

Classification model of residential power consumption mode based on DBSCAN and gravitational search algorithm

SU Shi¹, LI Kangping², YAN Yuting¹, LU Hai¹, WANG Xinkang²,
LIU Liming², WANG Fei^{2,3}, DONG Ling⁴

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

3. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana 61802, USA;

4. State Grid Qinghai Province Electric Power Company, Xining 810008, China)

Abstract: The research on the classification of residential power consumption modes can provide support for the design of demand side response scheme, the load characteristic analysis and its high precision prediction. Firstly, the typical power consumption modes of customers are extracted by DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise). Then, considering the effect of different periods in a day and season change on the power consumption behaviors of customers, six features are extracted, which can describe the power consumption behaviors of customers in different time scales. Based on this, a classification model of residential power consumption mode based on gravitational search algorithm is proposed. Finally, measured residential power consumption data are clustered and the power consumption modes of customers of each cluster and as well as their potentials for participation in demand side response are analyzed.

Key words: power consumption mode; clustering algorithms; feature extraction; classification; gravitational search algorithm; density-based spatial clustering

(上接第 128 页 continued from page 128)

Voltage fluctuation characteristics of traction power supply system considering AC-DC-AC electric locomotives accessed

ZHANG Guinan, LIU Zhigang, XIANG Chuan, YAO Shulong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon of voltage instability and locomotive blockade in traction power supply system considering the AC-DC-AC electric locomotives accessed, it is proved that this phenomenon originates from a power quality problem in theory instead of a low frequency oscillation. The modulation theory is employed to analyze the mechanism of the symmetrical frequency component as a result of the low frequency signal transmitting in the rectifier. The voltage instability characteristics are analyzed by means of DFT (Discrete Fourier Transform), and the dominant modes are identified by the TLS-ESPRIT (Total Least Square-Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) algorithm. On this basis, this phenomenon is defined as a voltage fluctuation problem. The signal is reconstructed by the mathematical expression of voltage fluctuation, and the effectiveness of the proposed methodology is further verified by analyzing the performance evaluation index of the reconstructed signal.

Key words: AC-DC-AC electric locomotive; voltage fluctuation; DFT; symmetrical frequency; TLS-ESPRIT algorithm; modal analysis; signal reconstruction