

基于改进虚拟支路法的高速铁路牵引网 串联谐振分析

王 斌, 邱忠才, 韩旭东, 姜晓锋, 高仕斌

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 提出了改进虚拟支路法的串联谐振分析方法。将非理想的谐波电压源等效为等效阻抗和 Norton 支路的组合, 利用由节点导纳矩阵得到的关联矩阵代替回路阻抗矩阵进行串联谐振分析, 通过支路法求取支路电流响应获得串联谐振频率及谐振幅度, 有效地解决了节点导纳矩阵维数较大问题。利用所提方法对高速铁路牵引网串联谐振进行分析, 结果证明了它的准确性和有效性。

关键词: 虚拟支路法; 高速铁路; 串联谐振; 支路法; 牵引

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.014

0 引言

我国高速铁路动车组变流器均采用正弦脉宽调制 (SPWM) 技术, 使得低次谐波含量大幅降低, 但在开关频率偶数倍附近产生了不可忽略的高次谐波。高次谐波电流在牵引网传输过程中, 得到了不同程度的畸变和放大。当牵引网参数和机车参数在某一频率下匹配时, 即认为牵引网发生了谐波谐振, 会引起避雷器、绝缘子、并联补偿装置的爆炸等^[1-4]。牵引网中的谐波谐振分为并联谐振和串联谐振, 2 种谐振的特性并不相同, 并联谐振产生节点过电压, 串联谐振使回路中产生较大的谐波过电流, 造成较大的线路电压损耗, 并对周遭的环境产生较大的电磁干扰。从这个角度而言有必要针对牵引网串联谐振展开分析, 从而对牵引网出现的谐波谐振危害, 根据不同特性应具体分析, 采取不同的抑制措施。

频谱分析法是当前唯一能准确识别谐振存在和确定串并联谐振频率的通用方法^[5], 该方法是利用系统节点阻抗矩阵的频率扫描进行分析, 从而使每个节点都含有系统所有的谐振信息, 因此不能有效分析串联谐振。文献^[6-7]提出了模态分析法和 S 域分析法; 模态分析是通过分析节点导纳矩阵的特征根及特征向量的依频性质, 得到相关的谐振信息; S 域分析是将频域转化为复频域, 通过建立节点电压输出与节点电流注入的传递函数进行分析, 传递函数的极点即确定为并联谐振频率, 其零点即可确定串联谐振频率。这些方法在分析节点过电压即并联谐振问题上已有统一的结论, 但对串联谐振的

分析仍然没有定论^[8]。文献^[9-10]提出使用支路法分析串联谐振, 实际上非线性激励源仍是谐波电流源, 依然属于并联谐振范畴, 而非串联谐振。文献^[11]通过增加虚拟支路模拟谐波电压源, 通过增加回路阻抗矩阵维数得到了与频谱分析法较一致的结论。若以频谱法作为串联谐振分析的检验标准, 文献^[11]提出的虚拟支路法将成为分析串联谐振又一有效的手段, 但该方法对于复杂系统或多导体传输线路的阻抗矩阵建模难度较大, 且维数较高。本文将谐波电压源及非线性负荷等效谐波阻抗转换为谐波电流源与导纳并联形式, 利用由节点导纳矩阵得到的关联矩阵代替回路阻抗矩阵进行串联谐振分析, 将虚拟支路法进行改进, 使之成为分析串联谐振的有效手段。

1 串联谐振分析方法比较

图 1 为简单的电路系统, 其谐振分析电路可等效为图 2。图 2 中, Z_p 为该电路系统等效阻抗; X_{Ti} 为变

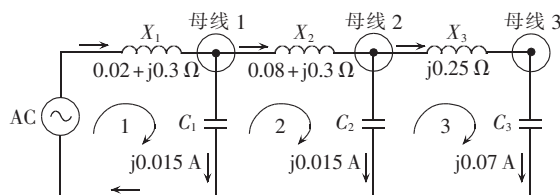


图 1 简单电路系统
Fig.1 Simple circuit system

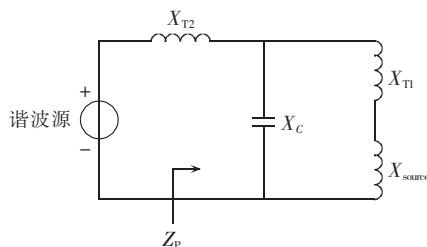


图 2 等效谐振电路
Fig.2 Equivalent resonant circuit

收稿日期: 2014-12-01; 修回日期: 2015-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51177139); 高速铁路基础研究联合基金重点资助项目 (U1134205)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51177139) and High-Speed Rail Joint Fund Key Projects of Basic Research (U1134205)

压器阻抗; X_{T2} 为谐波源阻抗; X_C 为系统电容阻抗; X_{source} 为系统电源阻抗。

由图 2 可见,从谐波源看进去的系统阻抗为:

$$Z_{sys}=Z_P+X_{T2}=\frac{j\omega(L_{eq}+L_{T2}-\omega^2CL_{eq}L_{T2})}{1-\omega^2CL_{eq}} \quad (1)$$

其中, $Z_P=\frac{X_CX_{eq}}{X_C+X_{eq}}$; $X_{eq}=X_{source}+X_{T1}$; $X_{eq}=\omega L_{eq}$; $X_{T2}=\omega L_{T2}$;
 $\omega=2\pi f$, f 为系统频率。

则串联谐振频率为:

$$f_{ser}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L_{eq}+L_{T2}}{CL_{eq}L_{T2}}} \quad (2)$$

并联谐振频率为:

$$f_{par}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{CL_{eq}}} \quad (3)$$

可见,串联谐振主要与串联支路有关,而并联谐振是由相互并联的支路引起的。

利用频谱法对图 1 所示的电路进行分析,可得系统的节点阻抗分布如图 3 所示。图中,3.84 p.u.、16.51 p.u. 等为并联谐振频率相对工频的标么值。按照节点驱动点阻抗最大为并联谐振、最小为串联谐振的判据,由图 3 可见,该电路系统有 3 个并联谐振频率和 6 个串联谐振频率。分别利用模态阻抗回路法^[8]、支路法^[9-10]、虚拟支路法^[11]对同一电路进行谐振分析,得到该电路的阻抗分布如图 4 所示。为便于和支路法比较,图 4 中虚拟支路法和模态回路法得到的阻抗值均乘以了 10。

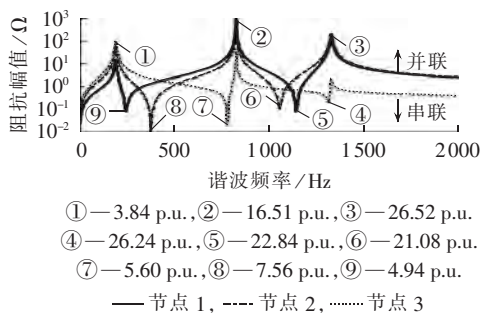


图 3 频谱法分析结果

Fig.3 Results of resonance analysis by spectrum method

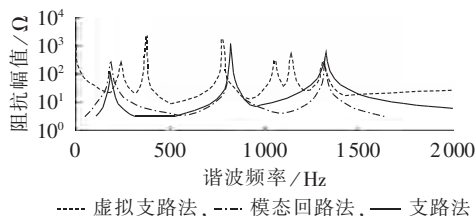


图 4 不同方法的谐振分析结果

Fig.4 Results of resonance analysis by different methods

由图 4 可见,支路法和模态回路法得到了相同的串联谐振频率,且与频谱法得到的并联谐振频率相等,则可知其并非为串联谐振,只有虚拟支路法得到了与图 3 完全一致的分析结果。

虚拟支路法即假设在电路系统每一节点和参考节点之间增加一条连接支路,当分析到该支路短接情况下的回路阻抗矩阵时,则将该支路的阻抗置为 0,使其短路,而分析其他支路短接时,又将其置为无穷大,从而依次生成每一节点对参考节点短接时的节点阻抗,用模态分析其特征值,最后所得结果即可反映所有的串联谐振点位置和谐振频率^[11]。然而,由于高速铁路牵引供电系统的多导体分布特性和电路拓扑结构的动态变化性,利用虚拟支路法对其进行谐波谐振分析仍然存在以下问题:对多导体分布参数的建模复杂且难以选取合理的独立回路;回路的选取多种多样,无法确定哪些回路对串联谐振的影响程度;实际中的谐波电压源并不是理想的,需要增加导纳支路。

2 改进虚拟支路法

串联谐振可认为是由谐波电压源激励产生的,即在极小的线路阻抗中产生较大的谐波电流。按非线性负荷的性质,可将谐波电压源等效为如图 5 所示的戴维南等效电路,且根据谐波电压源所在支路的形式不同^[8,11-12],可分别得到并联支路和串联支路的等效电路,如图 5(a)和 5(b)所示。图中, $k=1,2,\dots,n$ 。

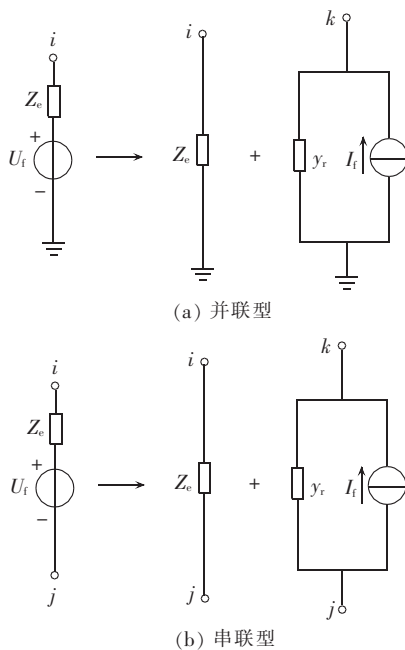


图 5 谐波电压源等效电路模型

Fig.5 Equivalent circuit model of harmonic voltage source

考虑到非理想情况下非线性负荷的阻抗特性和谐波电压激励特性,若 Z_e 趋近于 0,则可认为该非线性负荷为理想谐波电压源;若 Z_e 趋于 ∞ ,则可认为其为理想谐波电流源。实际中的谐波源并非理想的,故可将谐波电压源等效为 Z_e 和 Norton 电路的组合,其中 y_r 为极大数值(导纳极小),用于模拟电压源内阻抗,

可选取为纯电阻,如 10^6 S 等。经笔者分析发现,当 y_r 大于 10^5 S 后,该电阻不会对谐振分析产生影响,该值越大,则分析精度越高,从而可按照导纳极小的原则,将谐波电压源等效为 Z_e 和 Norton 电路的组合,即对电路系统增加导纳支路。需要注意的是, Z_e 和 Norton 电路并不是简单的并联关系, Z_e 支路是对原谐波源阻抗的一种等效,而 Norton 电路是进行串联谐振分析所施加的激励源,Norton 电路需分别与系统中的所有节点连接,如对系统中的节点 i ,Norton 电路需分别与系统中的 n 个节点进行遍历,故图 5 中 $k=1,2,\dots,n$ 。其物理意义与频谱法一样,不同的是该 Norton 电路是对节点进行短路处理,而频谱法是开路,这也是分析串联谐振与并联谐振的区别所在。

由上述等效电路,对于并联型等效电路,可修改系统的节点导纳矩阵为:

$$Y_{\text{parallel}} = \begin{bmatrix} y_{11} + y_r^{(1)} & & & \\ & \ddots & & \\ & & y_{ii} + y_r^{(i)} + 1/Z_e & \\ & & & \ddots \\ & & & & y_{kk} + y_r^{(k)} \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & & y_{nn} + y_r^{(n)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于串联型等效电路的系统节点导纳矩阵可修改为:

$$Y_{\text{series}} = \begin{bmatrix} y_{11} + y_r^{(1)} & & & \\ & y_{ii} + y_r^{(i)} + 1/Z_e & \cdots & y_{ij} - 1/Z_e \\ & \vdots & & \vdots \\ & y_{ji} - 1/Z_e & \cdots & y_{jj} + y_r^{(j)} + 1/Z_e \\ & & & & y_{nn} + y_r^{(n)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,上标 (k) 表示将 Norton 电路依次连接在节点 k ($k=1,2,\dots,n$),每次均进行独立的计算,且当进行 $y_r^{(k)}$ 的时候其他 $y_r^{(\cdot)}$ 均为 0。

此时,需要关注的是支路的电流响应,而不是节点谐波电压响应。虚拟支路法为回路电流响应,实质上串联支路电流也等于唯一经过其的回路电流。在提取支路电流方法中, S 域分析法和支路法均可达到这个目的,为计算方便,本文用支路法建立串联支路电流与注入电流之间的对应关系。

假设系统中的一待考察支路 m (位于节点 i 与节点 j 之间,且 $y_{ij} \neq 0$) 的电压差为:

$$u'_m = u_i - u_j = c_m U \quad (6)$$

其中, c_m 为支路 m 的关联行向量,元素值 $c_{m,i}=1, c_{m,j}=-1, c_{m,\text{else}}=0$ 。

由矩阵 Y 的元素可获知节点之间的连接关系和

耦合程度,假设有 r 条独立的串联支路,按照初始节点从小到大的顺序,对支路进行编号,则有:

$$\begin{bmatrix} U'_1 \\ U'_2 \\ \vdots \\ U'_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1,n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{r,1} & c_{r,2} & \cdots & c_{r,n} \end{bmatrix}_{r \times n} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{或 } U' = C_{r,n} U$$

由式(6)、(7)可得串联支路 m 的电流 $J_m = -u'_m y_{ij}$ 、导纳 $d_m = -y_{ij}$;同样,对于并联支路,导纳 $d_a = y_{a,n} + \sum_{i=1}^{n-1} y_{a,i}$ 。

支路的导纳矩阵为:

$$D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_r) \quad (8)$$

此时支路电流向量为:

$$J = DCU \quad (9)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1,n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{r,1} & c_{r,2} & \cdots & c_{r,n} \end{bmatrix}_{r \times n}$$

其中,支路电流向量 $J = [J_1, J_2, \dots, J_r]^T$; C 为系统的电容矩阵。

结合式(7)和式(9),则有:

$$J = DCY^{-1}I = y_r R_{r \times n} U_f \quad (10)$$

此时,可通过控制谐波电压接入向量 $U_f = [u_{f1}, u_{f2}, \dots, u_{fN}]^T$,实现对不同节点、谐波电压大小、相位的选择,并改变频率值进行扫描,以确定 J 中各元素随频率的变化规律,在极大值点时即可认为发生了串联谐振。

由上可见,该方法对于系统节点导纳矩阵的建立相当于其他方法而言并没有增加难度,故考虑在 n 个节点中逐一添加谐波电压源,便可对系统进行对串联谐振分析,分析计算流程如图 6 所示。

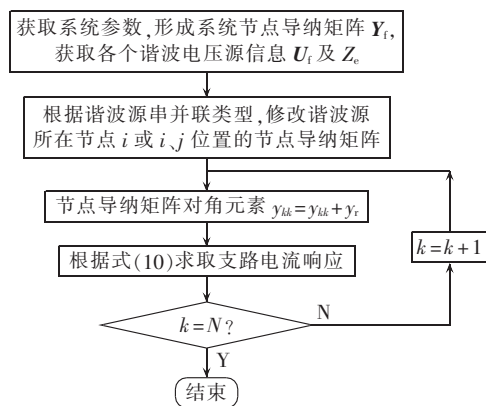


图 6 所提方法流程图

Fig.6 Flowchart of proposed method

利用该方法,对图 1 所示的电路系统进行分析,可得到如图 7 所示的 4.93 p.u.、7.56 p.u. 等 6 个串联谐振频率,“IN# 节点 1,OUT# 支路 2”表示 Norton 支路连接到节点 1,从而得到支路 2 的电流响应,其他

类似。该结果与利用频谱法分析得到的图 3 所示的结论一致。

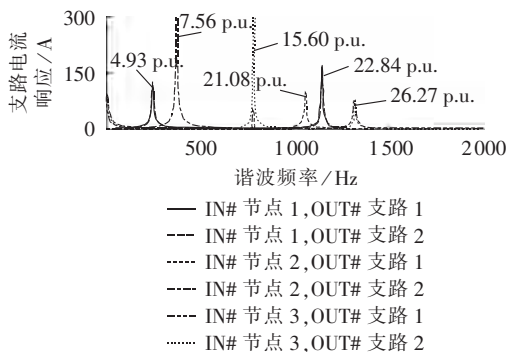


图 7 所提方法的串联谐振分析结果
Fig.7 Results of series resonance analysis by proposed method

由图 7 可见,相邻 2 条支路均含有相同的谐振频率,但与其他节点的激励无交叉,如针对节点 1 激励可以激发支路 1 和支路 2 频率为 4.93 p.u. 和 22.84 p.u. 的串联谐振。这就很好地解释了为何分析串联谐振需要串入电压源,而不是电流源。频谱法只是从节点注入较大电流而节点电压相应最小(与并联谐振相反)对串联谐振进行界定,并不能从物理上解释串联谐振带来的问题,而改进虚拟支路法更加满足物理意义,符合实际。与虚拟支路法修改回路阻抗矩阵一样,改进虚拟支路法需要对节点导纳矩阵进行修改,文献[11]的回路阻抗矩阵维数为 $2n$ 维,而改进虚拟支路法为 n 维,且节点导纳矩阵易于建模,更适用于复杂系统分析。

3 高速铁路牵引网串联谐振分析

对于采用 SPWM 技术的高速动车组而言,其交流侧网压是由调制波和直流侧电压决定的。由于变流器支撑电容可以较快地达到稳定,故变流器交流侧即为恒定的谐波电压 $S_{AB}U_d$ ^[13],其中 U_d 为动车组直流侧电压, S_{AB} 为三电平调制波。高速动车组的等效电路如图 8 所示,图中 Z_x 为车载牵引变压器泄漏阻抗。可见,在牵引供电系统中有谐波电压源存在,满足串联谐振的激发条件。

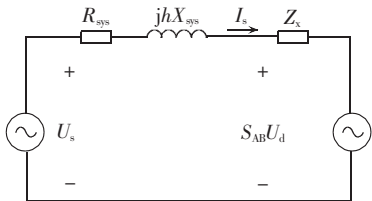


图 8 牵引供电系统等效电路图
Fig.8 Equivalent circuit of traction power-supply system

为验证改进虚拟支路法的实用性,本文将该方法应用于某实际高速铁路牵引网的串联谐振分析。该

高速线路主要采用 CRH2B 型动车组,牵引网为长度为 30 km 的 AT 网线路,外部供电系统等效为戴维南等效电路,输入电压 $U_s=55$ kV (接触线与钢轨之间为 27.5 kV,正馈线与钢轨之间为 -27.5 kV),牵引变压器漏抗 $Z_x=0.1+j 0.37 \Omega$,系统等效阻抗 $Z_s=10+j18.5 \Omega$,AT 漏抗 $z_g=1+j 4.5 \Omega$,滤波器参数选择 $L_f=400$ mH、 $C_f=2 \mu F$ 。牵引供电系统等效电路见图 9。

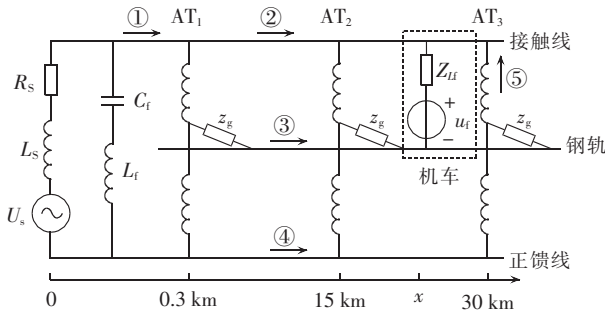


图 9 某实际牵引供电系统等效电路图
Fig.9 Equivalent circuit of an actual traction power-supply system

利用文献[14]的牵引网链式等效模型,建立分段牵引网等效模型。选择文献[9]中 AT 牵引网的电容 C_{tra} 与阻抗 Z_{tra} 矩阵参数,可求取链式模型参数如式(11)和式(12)所示。

$$j\omega Z_{tra} C_{tra} = T^{-1} A T \quad (11)$$

$$\begin{cases} Z_L = T [A^{-1/2} \sinh(A^{-1/2} \times l)] T^{-1} Y^{-1} \\ Y_L = Z^{-1} T [A^{-1/2} \tanh(A^{-1/2} \times l/2)] Y^{-1} \end{cases} \quad (12)$$

选取如图 9 所示的支路①—⑤,按照第 2 节的分析方法,可得到如图 10 所示的串联谐振分析结果,图中纵轴为标么值。

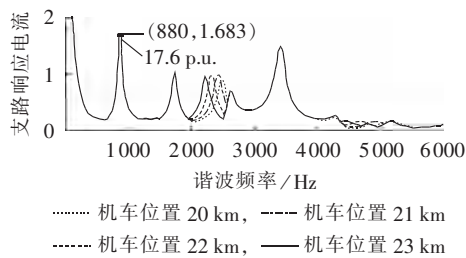


图 10 所提方法的串联谐振分析结果
Fig.10 Results of series resonance analysis by proposed method

由图 10 可见,机车位置的变化对串联谐振影响较小,这是由于高速动车组的功率因数接近为 1,可等效为纯电阻,因此对谐振影响较小。图 10 中出现了 17.6 次串联谐振,接触线和系统侧等支路的响应较大。图 11 为该高速铁路牵引网 AT 吸上线电流及其频谱,可见 AT 吸上线支路的 18 次谐波电流得到了严重的谐振放大,该次谐振频率与本文利用改进虚拟支路法计算所得的 17.6 次谐振频率较为接近,从而说明了该改进方法的准确性。

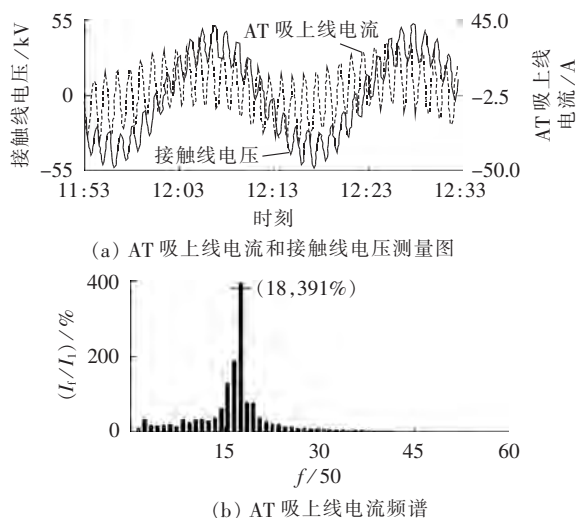


图 11 某高速铁路牵引网实测电流及其频谱
Fig.11 Measured current waveform and corresponding spectrum of high-speed railway traction network

4 结论

a. 本文在对比几种电路串联谐振分析方法的基础上,提出改进虚拟支路法,将非理想谐波电压源等效为等效阻抗和 Norton 支路,利用由节点导纳矩阵得到的关联矩阵代替回路阻抗矩阵进行串联谐振分析。

b. 利用改进虚拟支路法对一个简单电路系统的分析可见,该方法较文献[11]提出的虚拟支路法降低了电路阻抗矩阵的建模难度和矩阵维数,且把对复杂多导体电路的回路建模转变为节点导纳矩阵建模。

c. 通过对高速铁路牵引网串联谐振的分析,验证了改进虚拟支路法的准确性和适用性,从而可利用该方法分析谐波谐振问题,也可作为谐波治理和谐振抑制的校验方法。

参考文献:

- [1] LEE Hanmin, LEE Changmu, JANG Gilsoo, et al. Harmonic analysis of the Korean high-speed railway using the eight-port representation model[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 979-986.
- [2] 何正友, 胡海涛, 方雷, 等. 高速铁路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): 55-62.
HE Zhengyou, HU Haitao, FANG Lei, et al. Series resonance analysis in high-speed railway all-parallel AT traction power supply system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 55-62.
- [3] 瞿成明, 王慧贞. 串联谐振变换器中提高同步整流效率的研究[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(10): 27-30.
QU Chengming, WANG Huizhen. Synchronous rectifier efficiency improvement for series-resonant converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(10): 27-30.
- [4] 钱澄浩, 何正友, 高朝晖, 等. 高速铁路全并联 AT 牵引网短路故障情况下磁场环境特性分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 155-161.
QIAN Chenghao, HE Zhengyou, GAO Zhaohui, et al. Analysis of magnetic environment characteristics for high-speed railway all-parallel AT traction network with short circuit[J]. Electric Power

Automation Equipment, 2014, 34(3): 155-161.

- [5] ALBERTO D, MORIS G, SONIA L. Impact of high-voltage primary supply lines in the 2×25 kV-50 Hz railway system on the equivalent impedance at pantograph terminals[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2012, 27(1): 164-175.
- [6] XU W, HUANG Zhenyu, CUI Yu, et al. Harmonic resonance mode analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1182-1190.
- [7] SERGIO L V, NELSON M, LEONARDO T G L. A Newton-Raphson method based on eigenvalue sensitivities to improve harmonic voltage performance[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(1): 334-342.
- [8] 仰彩霞, 刘开培, 王东旭. 基于回路模态分析法的串联谐波谐振评估[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2459-2462.
YANG Caixia, LIU Kaipei, WANG Dongxu. A loop modal analysis method for series harmonic resonance assessment[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2459-2462.
- [9] 胡海涛, 何正友, 张民, 等. 高速铁路全并联 AT 供电系统串联谐振分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 52-60.
HU Haitao, HE Zhengyou, ZHANG Min, et al. Series resonance analysis in high-speed railway all-parallel AT traction power supply system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 52-60.
- [10] 王斌, 姜晓锋, 高仕斌, 等. 基于支路法的串联谐振分析[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(6): 1021-1026.
WANG Bin, JIANG Xiaofeng, GAO Shibin, et al. Series resonance analysis based on branch method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(6): 1021-1026.
- [11] 周辉, 吴耀武, 姜素华, 等. 基于模态分析和虚拟支路法的串联谐波谐振分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 84-89.
ZHOU Hui, WU Yaowu, LOU Suhua, et al. Series resonance analysis based on modal analysis and dummy branch method [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 84-89.
- [12] HUANG Z, CUI Y, XU W. Application of modal sensitivity for power system harmonic resonance analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(1): 222-231.
- [13] 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 90-98.
- [14] 吴命利. 电气化铁道牵引网的统一链式电路模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 52-58.
WU Mingli. Uniform chain model for traction network of electric railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 52-58.

作者简介:



王斌

王斌(1980—),男,山西府谷人,博士研究生,研究方向为牵引供电系统电能质量、仿真分析(E-mail:bwang@swjtu.edu.cn);

邱忠才(1981—),男,山东临沂人,讲师,博士研究生,研究方向为电力电子与电力传动等(E-mail:zhongcai1981@163.com);

韩旭东(1978—),男,山西榆次人,博士研究生,研究方向为牵引供电系统谐波仿真分析(E-mail:hanxd@swjtu.edu.cn);

姜晓锋(1989—),男,山东威海人,硕士研究生,研究方向为牵引供电系统暂态过程分析(E-mail:157452986@qq.com);

高仕斌(1964—),男,湖北随州人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为继电保护与变电站综合自动化、电气设备在线监测等(E-mail:gao_shi_bin@126.com)。

高压直流输电系统开路电压的研究

张 烁,李永丽,李博通

(天津大学 电力系统仿真控制教育部重点实验室,天津 300072)

摘要: 针对现有高压直流输电系统开路电压公式不适用于计算带直流线路开路试验开路电压的问题,分别对带/不带直流线路开路试验的试验原理及开路电压建立过程进行分析,解释了带直流线路开路试验中开路电压较小的原因,并通过对现有开路电压计算公式进行修正,给出了适用于带直流线路开路试验的开路电压计算公式。所提公式可用以修正直流开路试验电压差值保护整定值,避免了带线路开路试验中电压差值保护的误动。利用 PSCAD 仿真软件搭建 ± 500 kV 高压直流输电系统仿真模型,对所提公式进行了仿真验证。仿真结果证明所提公式具有较高的准确性。

关键词: 高压直流输电; 高压直流输电开路试验; 开路电压; 触发角; 直流线路参数; 滤波器; 仿真; 模型

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.015

0 引言

高压直流输电因其在远距离、大容量输电方面的优势,近年来在国内得到了大力发展。截至 2013 年底,我国已建成超、特高压直流输电线路 20 余条,高压直流输电正逐渐成为未来我国跨区域大容量输电的重要方式^[1-6]。

直流开路试验 OLT(Open Line Test)又称空载加压试验(以下简称开路试验),是检测换流阀及直流场设备、直流控制系统、直流输电线路能否正常工作的重要手段。直流系统在设备检修或长时间停运后,都必须通过开路试验才具备正式送电条件^[6-7]。在开路试验过程中,操作人员通过控制换流器触发角,使测量电压(即开路电压)按一定变化率逐渐升高,并通过观察测量电压能否逼近预设的目标电压来判断各设备的工作状况是否正常。开路试验目标电压根据开路电压理论值选定,因此,开路电压计算公式的准确性对于试验成功与否至关重要。

收稿日期:2014-12-20;修回日期:2015-09-09

根据检测对象的不同,开路试验可分为不带直流线路和带直流线路 2 种。从试验系统结构上看,2 种开路试验的区别仅在于直流线路侧开路点位置不同,不带直流线路开路试验开路点设在直流线路首端,主要用于检测换流阀及直流控制系统的工作状况;带直流线路开路试验的开路点设在直流线路末端,除了检测换流阀及直流控制系统的工作状况外,还可用于检测直流滤波器等直流场设备及直流线路的绝缘水平和耐压能力。对于不带线路开路试验,ABB 公司推导了其开路电压计算公式(以下简称为现有公式),并依此设计了开路试验电压差值保护,保护动作于开路电压测量结果与计算结果之差大于动作门槛值(± 500 kV 系统的动作门槛值为 150 kV)。而对于带直流线路开路试验,由于目前尚未有机构或个人给出其开路电压的推导公式,因此,在实际试验中也是利用现有公式计算其目标电压。但是根据实际试验结果,带直流线路开路试验的开路电压与不带线路时相比明显减小^[9-10],若利用现有公式计算其目标电压,则测量电压与目标电压之间将存在较

Series resonance analysis based on improved dummy branch method for high-speed railway traction network

WANG Bin, QIU Zhongcai, HAN Xudong, JIANG Xiaofeng, GAO Shibin

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

Abstract: A method of series resonance analysis based on the improved dummy branch method is proposed, which equals the non-ideal harmonic voltage source with the combination of equivalent impedance and Norton circuit, replaces the loop impedance matrix with the correlation matrix obtained by the node admittance matrix to analyze the series resonance, and applies the branch method to obtain the branch current response for calculating the series resonance frequency and amplitude to effectively avoid the large dimension of the node admittance matrix. The proposed method is used to analyze the series resonance of high-speed railway traction network and the analytical results show its correctness and effectiveness.

Key words: dummy branch method; high-speed railway; series resonance; branch method; electric traction