

基于模态分析的运动负荷牵引电网谐波谐振分析

徐志强, 李冰, 周田华, 张海波

(北京送变电公司, 北京 100044)

摘要: 为了防止牵引网谐波谐振发生时产生的系统过电压, 须获得准确的谐波谐振频率及位置, 从而消除运动负荷谐波谐振对牵引网的影响。利用模态分析法, 对牵引网络节点导纳矩阵的特征根进行分析, 从而得出运动负荷牵引电网谐波谐振的产生与频率及机车运行位置的关系。仿真分析所得谐波谐振与频谱分析的比较结果证明此方法正确。理论分析及实际应用均证明该方法是进行运动负荷牵引网谐波分析的有效工具。

关键词: 牵引系统; 运动负荷; 谐波谐振; 模态分析; 特征根

Harmonic resonance assessment of traction system with moving load based on modal analysis

XU Zhi-qiang, LI Bing, ZHOU Tian-hua, ZHANG Hai-bo

(Beijing Electric Power Transmission and Transformation Company, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to prevent the over-voltage brought by harmonic resonance of traction system, it is necessary to get the exact frequency and the position of locomotive which can eliminate the effects of moving load harmonic resonance on the traction system. Modal analysis is used to study the eigenvalues of the network admittance matrix. Using this method, the relationship between harmonic resonance of traction system and frequency and locomotive position can be obtained. Compared with the result of frequency scan analysis, it demonstrates that the method used in this paper for simulation is correct. Theoretical analysis and case study have confirmed that the used method is a valuable tool of harmonic analysis for traction power system with moving load.

Key words: traction system; moving load; harmonic resonance; modal analysis; eigenvalue

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0076-05

0 引言

牵引电网是一个由电感和电容组合而成的非常复杂的多网孔网络, 电力机车作为运动型负载, 在运动过程中会使牵引电网系统参数不断变化。于是在不同的频率和机车运动的不同位置, 牵引电网会呈现不同的阻抗性质和数值。若某次谐波达到谐振条件, 会使系统的电压、电流严重畸变, 损坏系统元件^[1-4]。

谐波谐振是由于系统中的容性元件和感性元件之间的能量交换造成的, 虽然人们对于谐波谐振已经有了很多的了解, 但能够系统分析这种现象的方法和工具还比较少^[5-8]。当前唯一能够识别谐振存在和确定谐振频率的方法只有频谱分析^[9-13], 但这种工具并不能提供有效的解决该问题的更多信息。文献[14-15]提出了基于模态分析的谐波谐振评估方法, 该方法通过对网络导纳矩阵特征根的分析, 得到有关谐振产生的机理和特性, 为分析谐波谐振问题提供了新的思路。

但文献[14-16]都是对静态的电力系统网络进行谐波谐振的评估, 仅考虑频率对谐波谐振产生的影响。对牵引网来说, 谐波谐振的产生不仅与频率有关, 还与机车运行的位置有关。随着我国众多新型电力机车的投入使用, 新型机车与我国原有的牵引网的参数匹配问题越来越受到重视, 详细分析谐波谐振的产生与频率及机车运行位置的关系是一个非常重要的课题。

1 模态谐振的概念

假设根据对系统阻抗的频谱分析得知系统受频率为 f 的并联谐振。则通过式(1)计算出的电压向量的某些元素对应于频率 f 有很大的值:

$$\mathbf{U}_f = \mathbf{Y}_f^{-1} \mathbf{I}_f \quad (1)$$

式中: \mathbf{Y}_f 为系统网络在频率为 f 时的导纳矩阵; \mathbf{U}_f 、 \mathbf{I}_f 为系统网络在频率为 f 时的节点电压和节点注入电流矩阵。为了简化符号, 以下省略下标 f 。严重的谐波谐振意味着某些节点电压非常高,

这一般在矩阵 \mathbf{Y} 趋近于奇异时发生。因此分析矩阵 \mathbf{Y} 是如何趋于奇异的就成为一个解决问题的可行方法, 而现有的特征根分析技术就可以很好地完成这一任务。矩阵 \mathbf{Y} 可以分解为式 (2) 形式^[17-18]:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{L}\mathbf{A}\mathbf{R} \quad (2)$$

式中: \mathbf{A} 为对角特征值矩阵; \mathbf{L} 、 \mathbf{R} 分别为左、右特征向量矩阵, 且 $\mathbf{L} = \mathbf{R}^{-1}$ 。

将式 (2) 代入式 (1) 得:

$$\mathbf{U} = \mathbf{L}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{R}\mathbf{I} \text{ 或 } \mathbf{T}\mathbf{U} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{R}\mathbf{I} \quad (3)$$

定义 $\mathbf{V} = \mathbf{R}\mathbf{U}$ 为“模态电压向量”, $\mathbf{J} = \mathbf{R}\mathbf{I}$ 为“模态电流向量”, 则式 (5) ~ (11) 简化如下:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{J} \text{ 或}$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_n^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

导纳矩阵特征值倒数的单位是阻抗, 且命名为“模态阻抗” \mathbf{Z}_m 。从式 (4) 可以看出, 如果 $\lambda_1 = 0$ 或者非常小, 则很小的模态注入电流 J_1 将导致很大的模态 1 电压, 而其他的模态电压将不受影响, 因为它们和模态 1 电流之间没有“耦合”。因此, 在模态域中可以很容易识别出谐振的“位置”。也就是说谐振实际上只在某个特定模态下发生, 它与某个节点的注入无关也并非由其引起。因此称最小的特征值为谐波谐振的“关键模式”, 称其左、右特征向量为“关键特征向量”。

模态电流 J_1 是实际电流在第一个特征向量方向上的线性映射:

$$J_1 = R_{11}I_1 + R_{12}I_2 + \dots + R_{1n}I_n \quad (5)$$

可以看出如果 T_{13} 有最大值, 则节点电流 I_3 对模态 1 电流有最大贡献。也就是说节点 1 最容易受激励而出现模态 1 谐振。另一方面, 如果 $T_{13} = 0$, 无论电流 I_3 多大都不会激励起这种模态谐振。关键向量 $[R_{11}, R_{12}, \dots, R_{1n}]$ 的值可以作为一种特征, 用来判断各节点电流能在多大程度上激励起模态 1 谐振。

节点电压与模态电压之间的关系为:

$$\mathbf{U} = \mathbf{L}\mathbf{V}$$

则:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{12} \\ \vdots \\ L_{1n} \end{bmatrix} V_1 + \begin{bmatrix} L_{22} \\ \vdots \\ L_{2n} \end{bmatrix} V_2 + \dots + \begin{bmatrix} L_{nn} \\ \vdots \\ L_{nn} \end{bmatrix} V_n \approx \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{12} \\ \vdots \\ L_{1n} \end{bmatrix} V_1 \quad (6)$$

若系统出现模态 1 谐振, 则 V_1 的值比其它模态电压的值大很多, 因此式 (6) 的近似是允许的。式 (6) 揭示出电压 V_1 对实际电压的贡献可以用向量 $[L_{11}, L_{12}, \dots, L_{1n}]^T$ 来表示。如果 L_{31} 的值最大, 则节点 3 上的节点电压也会有最大值, 这就说明在节点 3 最容易观察到模态 1 谐振。如果 $L_{31} = 0$, 则节点 3 的电压不会受模态 1 电压的影响。

“关键模式”和“关键特征向量”具有以下性质:

(1) 对某种模式具有最高可观测性 (即具有最大的左特征向量) 的节点, 同时也具有最大可激励性 (即具有最大右特征向量)。如果一种与谐振频率匹配的谐波电流注入这个节点, 这个节点上会出现最高谐波电压。

(2) 参与因子等于特征向量的平方。谐振模态分析中, 只需一个指标 (及特征向量或参与因子) 就足够了。具有最大参与因子的节点可以被认为是“谐振的中心”。

2 基于简单牵引网络阻抗矩阵的模态分析

我们将上节介绍的谐振模态概念应用于简单的电力牵引网络, 将电力机车看作一个谐波电流源, 输电线路用等值 Γ 型电路等效, 电力牵引网可简化为图 1。图中, R_s 、 L_s 为系统阻抗; C_c 、 L_c 为补偿电容器组; 线路总长度为 l , 这里取 $l = 40 \text{ km}$; 线路单位长度阻抗为 $z_0 = 0.22 + j0.58 \text{ } (\Omega/\text{km})$, 线路单位长度导纳为 $y_0 = j1.14 \times 10^{-6} \text{ } (\text{S}/\text{km})$ 。

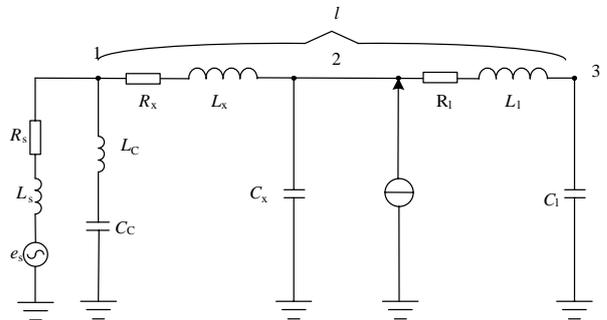


图 1 简单牵引系统结构图

Fig.1 Simple traction system

频谱分析得到的是待研网络系统阻抗的模值与谐波次数或谐波频率之间的关系图, 而阻抗值的突

然上升标志着并联谐振。针对图 2，以线路端口（变电所）为测试点，利用戴维南等效定理，求出网络等效阻抗的幅值，画出阻抗幅值与谐波次数及机车运行位置的关系。图 2 显示了机车运行于不同位置

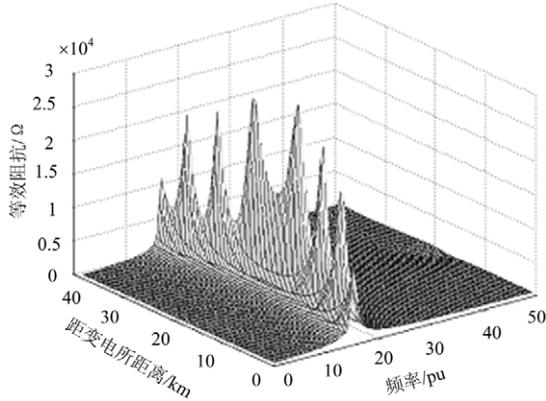


图 2 简单牵引系统阻抗的频谱分析

Fig.2 Frequency scan results of simple traction system

时，网络各节点的频谱分析结果。图中横坐标为频率 (pu)，纵坐标为机车距牵引变电所的距离 (km)，竖坐标为系统等效阻抗的模值 (Ω)。这时难以识别出谐振状态下每个节点的重要性，且随着网络复杂程度的提高，对各节点进行频谱分析也越来越繁琐。

将模态分析法运用于本系统，在机车运行的不同位置 and 不同频率处分别列写系统的导纳矩阵，求出机车在不同位置不同频率下系统的模态阻抗的幅值，运用 Matlab 工具将所得的模态阻抗绘成曲面图，模态阻抗如图 3 所示。图中模态阻抗的突然增加，及曲面极大值点对应不同的谐振发生频率。根据计算可知，系统只可能发生模式 3 谐振，模态分析结果见表 1。由表 1 可以看出，节点 3 对于谐振模式 3 有最大的特征向量和参与因子。这些结果证明了模态分析提供的信息能够揭示最容易激励起或观察到谐波谐振的位置。

表 1 系统模态分析结果

Tab.1 Modal analysis results of the test system

谐振	关键特征值	关键特征向量						参与因子 (幅值)		
		R			L			节点 1	节点 2	节点 3
		节点 1	节点 2	节点 3	节点 1	节点 2	节点 3			
模式 3	0.065 7 ∠ -1.565	$R_{31} = 0.071$ ∠0.023°	$R_{32} = 0.479$ ∠ -0.001°	$R_{33} = 0.874 5$ ∠0.01°	$L_{31} = 0.071$ ∠0.021°	$L_{32} = 0.479$ ∠ -0.001°	$L_{33} = 0.874 5$ ∠0	$PF_{31} = 0.005$	$PF_{32} = 0.23$	$PF_{33} = 0.765$

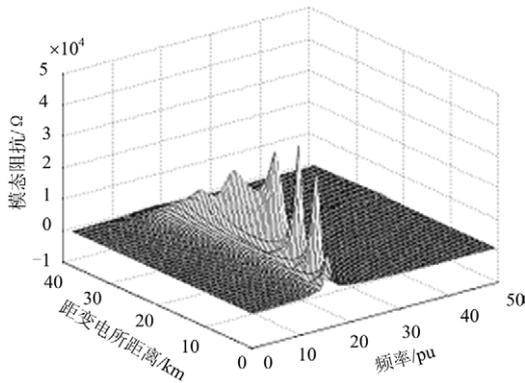


图 3 简单牵引系统的模态阻抗

Fig.3 Modal impedances of simple traction system

将用阻抗频谱分析和模态阻抗分析所得的谐振点列于表 2、表 3。根据图 2、3 及表 2、表 3 的比较可明显看出，两种方法找出的谐振位置及频率基本相同，说明用模态分析法解决运动负荷谐波谐振的问题是正确可行的。

表 2 系统阻抗频谱分析谐振点

Tab.2 Resonance points based on frequency scan

f / pu	16	17	18	19	18	17
l / km	1	4	9	15	30	35

表 3 模态分析谐振点

Tab.3 Resonance points based on modal analysis

f / pu	16	17	18	19	18
l / km	1	4	9	15	29

3 基于模态分析的 AT 网运动负荷谐波谐振分析

为验证本文所提出方法的实际性能，本文利用它来分析某 AT 牵引网的谐波谐振问题，AT 牵引网的接线如图 4 所示。图中 F 为接触线；R 为钢轨；T 为正馈线； R_s 、 L_s 为电源内电阻和电感； L_k 为自耦变压器等效电感， L_C 、 C_C 分别为并联补偿电感及电容。三个 AT 所的间距分别为 a、b、c(km)。

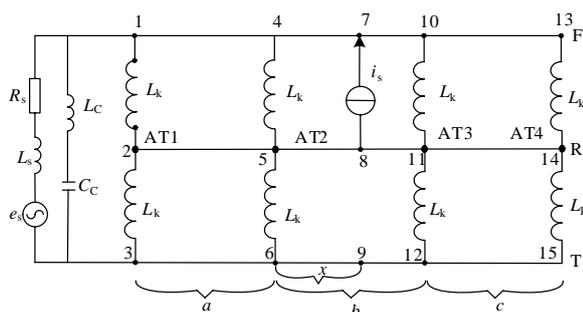


图4 AT牵引网等效电路图

Fig.4 AT traction system

自2007年某新型机车投入运行后,在该供电段不断出现高幅值的高次谐波。测试结果表明:在机车行驶至距AT1约12~16 km时,牵引网出现18次谐波谐振;在机车行驶至距AT2约2~8 km时,牵引网出现18、19次谐波谐振;在机车行驶至AT3—AT4之间时,牵引网出现19、21次谐波谐振。

需要说明的是,理想状况下,电力机车主变压器原边电流有半波对称的特点,偶次谐波为零。但实际运行中,由于电力电子变频器的不对称运行等特殊情况,牵引系统中会出现偶次及非标准频率的谐波分量。通常系统中偶次谐波的含量很小,但如果系统中产生谐振,偶次谐波将会被放大。

将牵引网用分布参数 Γ 型电路等效,考虑线路之间存在自感,互感,对地电容和线间电容,分别对机车运行于a、b、c三段的不同情况列写网络的导纳矩阵,运用模态分析法求机车运行于各段的模态阻抗。假设大地电阻率 $\rho = 100 \Omega/\text{m}$, AT牵引网部分的电容和阻抗矩阵为:

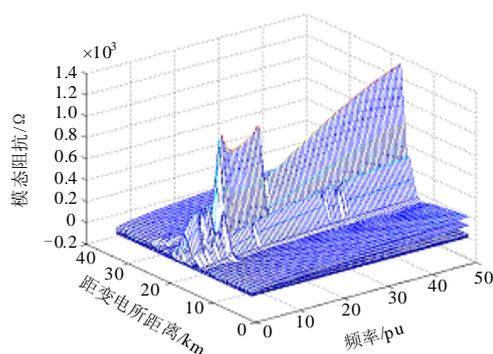
$$\mathbf{Z}_0 = \begin{bmatrix} 0.24631 & 0.049424 & 0.048989 \\ 0.049424 & 0.21544 & 0.042956 \\ 0.048989 & 0.042956 & 0.19934 \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} 0.68419 & 0.32878 & 0.31989 \\ 0.32878 & 0.74296 & 0.30586 \\ 0.31989 & 0.30586 & 0.48975 \end{bmatrix} \Omega/\text{km}$$

$$\mathbf{C}_0 = \begin{bmatrix} 0.011781 & -0.001131 & -0.0023141 \\ -0.0011331 & 0.0086592 & -0.0027706 \\ -0.0023141 & -0.0027706 & 0.059466 \end{bmatrix} \mu\text{F}/\text{km}$$

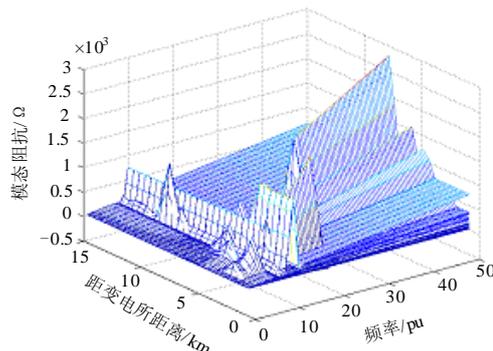
牵引网总长为48.376 km, 间距如下:

$a=17.36 \text{ km}$; $b=5.27 \text{ km}$; $c=15.69 \text{ km}$ 。

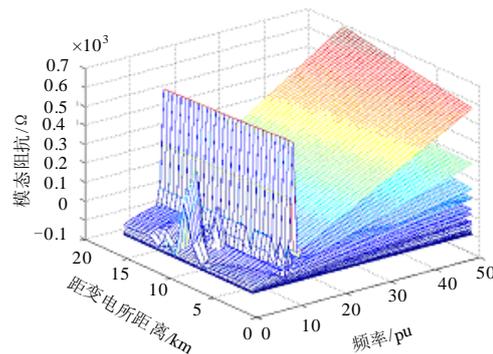
由图5及模态阻抗计算可知:



(a) 机车运行于a段的模态阻抗



(b) 机车运行于b段的模态阻抗



(c) 机车运行于c段的模态阻抗

图5 AT网牵引网的模态阻抗

Fig.5 Modal impedances of AT traction system

(1) 机车运行于AT1—AT2之间时会发生模态12和模态14谐振。由于系统节点较多,仅画出了系统模态阻抗曲面图。由图5(a)可知,机车运行至距AT1 13~15 km处容易发生11~23次谐振。

(2) 机车运行在AT2—AT3之间时会发生模态11谐振。机车在距AT2 3~8 km处容易发生19次谐振,在距AT2 7~8 km时也可能发生20次以上的谐振。在距AT2 13 km处容易出现18次谐振。

(3) 机车运行在AT3—AT4之间时会发生模态7和模态11谐振。在距离AT3 4 km处,谐振就开始出现,频率为19。在距离AT3 12 km处,21、23次谐波也比较容易出现。

(4) 由图 5 可看出系统还可能发生 ≥ 40 次的谐振, 但由于电力机车谐波电流通常不可能含有如此高频的分量, 因此谐波激励源不足, 不可能产生谐振。

由此可看出, 用模态分析对 AT 牵引网进行的谐波谐振分析与测试结果基本吻合。

4 结论

(1) 机车作为运动负荷在牵引网中行驶时, 牵引网会呈现不同的阻抗性质和数值。因此牵引网谐波谐振的产生不仅与频率有关, 还与机车运行的位置有关。

(2) 模态分析法作为一种特殊的数学方法, 可以有效地分析运动负荷下牵引网的谐波谐振, 并可通过与谐振模式相关的结点与特征根来识别。

(3) 根据模态分析法得出的结果可以为牵引网的参数匹配提供理论依据, 对牵引网进行简单改造以避免新型机车引起的谐波谐振问题, 保证牵引系统的安全运行。

参考文献

[1] 宋文南, 刘宝仁. 电力系统谐波分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
SONG Wen-nan, LIU Bao-ren. Harmonic analysis of power system[M]. Beijing: China Water Power Press, 1995.

[2] CEA Technology Inc. Impact of harmonics on utility equipment: a survey and review of published work[R]. Canada: Report No. T024700-5117, 2003.

[3] 谷毅, 赵玉柱, 张国威. 关于 500 kV 东明开关站启动调试期间发生电压谐振的分析[J]. 电网技术, 2002, 26 (12): 71-74.
GU Yi, ZHAO Yu-zhu, ZHANG Guo-wei. Discussion on voltage resonance occurred in Bao-ren 5231 transmission line firing start up of Dongming switching station[J]. Power System Technology, 2002, 26 (12): 71-74.

[4] 赵树强, 马燕峰, 贺春. 抑制谐波的配电网无功优化规划[J]. 电网技术, 2004, 28 (6): 71-75.
ZHAO Shu-qiang, MA Yan-feng, HE Chun. Reactive power optimal planning of distribution network with harmonic mitigation[J]. Power System Technology, 2004, 28 (6): 71-75.

[5] 李云阁, 施围. 应用解析法分析中性点接地系统中的工频铁磁谐振判据和消谐措施[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (9): 141-145.
LI Yun-ge, SHI Wei. Study of fundamental ferroresonance on neutral-grounded systems by using analytical method-criterion and elimination[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (9): 141-145.

[6] 王莉娜, 付青. 工厂供电系统谐波谐振的抑制[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (20): 41-44.
WANG Li-na, FU Qing. Harmonic mitigation in plant supply system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (20): 41-44.

[7] 束洪春, 刘娟, 王超, 等. 谐振接地电网故障暂态能量自适应选线新方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (11): 72-76.
SHU Hong-chun, LIU Juan, WANG Chao, et al. Adaptive method for fault circuit selection in arc suppression coils system by using transient energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (11): 72-76.

[8] 吴俊勇, 肖东晖. 特征结构分析及在电力系统次同步谐振研究中的应用[J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (11): 1-3.

[9] Smith B C, Arrillaga J, Wood A R, et al. A review of iterative harmonic analysis for AC-DC power system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13 (1): 180-185.

[10] Borner A, Grebe T, Gunther E, et al. IEEE harmonics model. simulation task force. modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks: part I[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11 (1): 452-465.

[11] HUANG Zhen-yu, XU Wilsun, Dinavahi V R. A practical harmonic resonance guideline for shunt capacitor applications[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18 (4): 1382-1387.

[12] 顾伟峰, 马伟明, 王东, 等. 12/3 相双绕组异步发电机自激起励时谐波谐振问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (6): 167-171.
GU Wei-feng, MA Wei-ming, WANG Dong, et al. Research on the harmonic resonance of the 3-12-phase double-winding asynchronous generator during its self-excitation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (6): 167-171.

[13] 江振华, 程时杰, 傅予力, 等. 含有可控串联补偿电容的电力系统次同步谐振研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (6): 47-52.
JIANG Zhen-hua, CHENG Shi-jie, FU Yu-li, et al. Analysis of subsynchronous resonance of power system with TCSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (6): 47-52.

[14] XU Wilsun, HUANG Zheng-yu, Yu Cui, et al. Harmonic resonance mode analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (2): 1182-1190.

[15] 徐文远, 张大海. 基于模态分析的谐波谐振评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (22): 89-93.

(下转第 121 页 continued on page 121)

正确的五防解锁信号时,测控装置提供一个“在线五防”的退出把手,测控装置的测控五防联锁闭锁触点不再经过监控五防,而是直接由本间隔的闭锁逻辑完成逻辑运算,并将测控五防联锁闭锁触点输出给操作箱。

2) 测控装置无法工作或者遭遇 GOOSE 断链时:当测控装置遇到紧急情况无法完成正确的联锁运算或者 GOOSE 断链无法将正确内容发送给操作箱时,在本间隔就地的端子箱提供一副万能钥匙,能够完成该间隔的所有可控刀闸的解锁,并就地操作。该间隔的防误闭锁功能完全由一次设备的电气联锁完成。

6 结语

近年来,随着 IEC61850 标准在变电站研究应用的逐步深入,对传统变电站的运行方式有了新的理念。本文介绍的基于 GOOSE 技术的在线式一体化五防系统能有效地解决传统微机五防系统带来的离线式操作状态不实时、五防锁具容易损坏等弊病,为变电站的五防操作提供了一种全过程可控的可靠操作模式,从而有效地避免变电站误操作的发生。相信本在线式五防系统在不久的将来,会在变电站中得到广泛的应用,为保证电网的安全可靠运行提供有效的手段。

参考文献

- [1] 刘平,张贺伟,孙红燕. 变电站网络化五防闭锁系统的研究[J]. 河北电力技术, 2009, 28(4): 5-8.
LIU Ping, ZHANG He-wei, SUN Hong-yan. Research of transformer substation network five-proof blocking system[J]. Hebei Electric Power, 2009, 28(4): 5-8.
- [2] IEC61850 变电站通信网络和系统系列标准[S]. 全国电力系统控制及其通信标准化技术委员会, 2002.

IEC61850 communication networks and systems in substations[S]. The Technical Committees of IEC of China Responsible by SGPRI, 2002.

- [3] 徐礼葆,周文,陈学明. GOOSE 在变电站安全闭锁的应用[C]. //中国电力系统保护与控制研讨会论文集.
XU Li-bao, ZHOU Wen, CHEN Xue-ming. Application of GOOSE of safety interlocking in substation[C]. //Colloquium of Protection and Control of China Electric Power System Conference.
- [4] 孙一民,侯林. 间隔层保护装置防误操作的实现方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 81-85.
SUN Yi-min, HOU Lin. Implementation of mal-operation proof on platforms of relay and control units between bays[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 81-85.
- [5] 赵金荣,王海峰. 基于嵌入式以太网的变电站自动化系统的实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 79-82, 89.
ZHAO Jin-rong, WANG Hai-feng. Implementation of substation automation system based on the embedded ethernet technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 79-82, 89.
- [6] 徐成斌,孙一民. 数字化变电站过称层 GOOSE 通信方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 42-45.
XU Cheng-bin, SUN Yi-min. Communication scheme of procedure level GOOSE in digital substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 42-45.

收稿日期: 2010-03-17; 修回日期: 2010-05-06

作者简介:

胡 巨(1979-),男,工程师,硕士研究生,主要从事电网自动化的研究和应用工作。E-mail: hufreedom@163.com

(上接第 80 页 continued from page 80)

- XU Wen-yuan, ZHANG Da-hai. A modal analysis method for harmonic resonance assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 47-52.
- [16] 周辉,吴耀武,娄素华,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 Yao-wu, LOU Su-hua, et al. Series resonance analysis based on modal analysis and dummy branch method[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 84-89.
- [17] Bellman R. Introduction to matrix analysis[M]. Second

edition. New York: McGraw-Hill Inc, 1970.

- [18] Perez-Arriaga I J, Verghese G C, Schweppe F C. Selective modal analysis with applications to electric power systems I. heuristic introduction[J]. IEEE Trans on PAS, 1982, 101(9): 3117-3125.

收稿日期: 2009-10-29; 修回日期: 2010-01-02

作者简介:

徐志强(1977-),男,工程师,博士,主要从事电力系统继电保护与故障诊断方面的研究。E-mail: zhiqiang_jz@163.com