

基于概率法的静止无功补偿器设计

边晓燕¹, 周歧斌², 王克文³, 符杨¹

(1. 上海电力学院上海市电站自动化技术重点实验室, 上海 200090; 2. 上海市防雷中心, 上海 201615;
3. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 采用概率论方法对 SVC (静止无功补偿器) 的辅助阻尼控制器进行鲁棒设计, 电力系统的多运行状态采用概率法进行描述。首先根据负荷变化曲线求得系统特征根的概率属性, 传统的特征根分析法被扩展成为概率特征根分析法。然后推导概率的特征根灵敏度指标, 并成功地用于 SVC 阻尼控制器的定位, 输入信号选择与参数设计。所提出的方法也通过一个两区域四机系统进行检验, 证实了该方法的有效性。

关键词: 特征根; 灵敏度; 概率; 静止无功补偿器 (SVC)

Robust SVC controller designed by probabilistic method

BIAN Xiao-yan¹, ZHOU Qi-bin², WANG Ke-wen³, FU Yang¹

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Municipal Lightning Protection Center, Shanghai 201615, China; 3. College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: An approach for robust Static Var Compensator (SVC) controller design is presented in this paper, in which multi-operating conditions of a power system is considered by probabilistic technique. Conventional eigenvalue analysis is extended to the probabilistic environment in which the statistical nature of eigenvalues corresponding to different operating conditions is described by their expectations and variances. Probabilistic sensitivity indices to facilitate robust SVC controller site, feedback signal selection and parameters adjusting are then proposed. The effectiveness of the presented approach is demonstrated on a two-area four-machine system.

Key words: eigenvalue; sensitivity; probability; static var compensator (SVC)

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0018-05

0 引言

当前我国电力系统正在经历着区域互连的飞速发展, 低频振荡成为影响电网互连的关键因素^[1-9]。低频振荡不仅给电力系统运行带来很多限制, 也影响着系统的安全性与经济性, 联络线上的弱阻尼更严重影响可传输容量^[3]。电力系统稳定器 (PSS) 是当前解决这一问题的一种有效方法。

电力电子技术的快速发展使得研究人员设计出来 FACTS 设备得以制造且并不昂贵, 这些 FACTS 设备可用于串联、并联补偿^[4,5], 也为抑制低频振荡提供另外一种提高系统阻尼的方法。静止无功补偿器 (SVC) 是最普通的一种 FACTS 设备, 它最初

被 Basin Electric Power Cooperative 用来在 western Nebraska 的 115 kV 网络上提供自动且持续的电压控制。如今, SVC 已经被广泛地用在电力系统里, SVC 的最主要作用是将母线电压保持在预先设定的值。装有电压调节器的 SVC 能够提供同步转矩, 却不能提供阻尼转矩^[6]。当安装了辅助的阻尼控制器, SVC 就可以为电力系统提供额外的阻尼。研究证明, SVC 提供的阻尼对改善区间振荡尤其有效。

目前, 国内外的学者对 SVC 的阻尼控制器设计作了很多研究工作, 例如 pole placement 方法^[1], 阻尼力矩分析法^[7]和特征根灵敏度分析法^[8]。但是几乎所有这些方法都是基于某一个运行点对线形化的电力系统进行分析。当运行点随着负荷的变化而改变时, 根据某一个运行点而设计的 SVC 参数将不再适用。因此研究者提出了对 SVC 进行鲁棒设计。例如 H ∞ 优化技术被用于鲁棒的 SVC 设计, 但对 H ∞ 优化时的权重系数难以选择, 并且由于 H ∞ 需要电

基金项目: 上海市浦江科技人才计划 (08PJ14060); 上海市优青基金项目 (sd108010); 上海市教委重点学科建设项目 (J51301)

力系统与所设计的控制器同阶数^[3], 就要求对电力系统进行降阶与化简, 因此 H_∞ 方法的应用具有很多限制。其他鲁棒设计方法对控制器采取在线调节, 包括自适应法^[9], 神经网络法^[10]。然而, 电力企业对在线调节缺乏信心^[11], 仍希望使用固定结构固定参数的阻尼控制器。因此, 需要设计可应用于较大运行范围的固定结构固定参数的 SVC 鲁棒的阻尼控制器。

1978 年概率方法首次应用于电力系统动态稳定研究^[12]。两机系统特征根的概率属性可以由已知系统参数的统计属性决定, 例如转子的转角与机械阻尼, 所考虑的不确定性是在某一条件下的测量、估计与预测错误。文献[13]中首次提出了概率稳定的概念, 用以研究单机系统的动态稳定运行极限。文献[14]中首次考虑了系统运行条件的变化。节点电压作为基本的随机变量由概率潮流计算求得, 特征根的概率属性通过节点电压的概率属性获得, 通过假设随即变量的正态分布, 将特征根表示为它的期望与方差。这一方法已成功地应用于多运行条件下的电力系统稳定研究。

本文对文献[14]中的概率方法进行扩展, 用于研究 SVC 的阻尼控制器鲁棒设计方法。一阶、二阶特征根灵敏度的计算方法将在第 2 节详细叙述。基于这些灵敏度的计算, 概率的特征根与特征灵敏度分析方法将分别在第 3 与第 4 节中介绍, 这些概率的特征根灵敏度将用于 SVC 阻尼控制器的定位、输入信号选择与参数的调节。在第 5 节, 所提出的方法通过算例系统进行验证。

1 特征根灵敏度

发电机, 系统元件 (例如 SVC) 与相关的控制设备都可以表达成由两种基本传输模块 (一阶与零阶) 构成的模型^[5,6]。用于获得 A 矩阵的偏微分方程与代数方程可以表述为

$$(K_a + p)X = (K_b + pK_l)(L_1X + L_3M) \quad (1a)$$

$$L_7X - L_9M = 0 \quad (1b)$$

其中: X 和 M 分别是状态与非状态变量, K_a, K_b 和 K_l 是含有一阶传输块参数对角矩阵。 L_1 和 L_3 是由 1 和 0 构成的关联子矩阵, 而 L_7 和 L_9 表述了 X 和 M 之间的数字关系。

线性化了的网络方程 $\Delta I = Y\Delta V$ 里的 Y 矩阵由四个子矩阵的形式直接插入 L_9 阵里, 并用另外四个等价导纳阵代表负荷特性。消去公式 (1) 中的非状态变量 M , A 矩阵可表述为

$$A = S(K_b F - K_a) \quad (2)$$

其中: $S = (I - K_l F)^{-1}$, $F = L_1 + L_3 H L_7$ 和 $H = L_9^{-1}$ 。

W_k^T 和 U_k 分别是左右特征向量, 并且满足 $W_k^T U_k = 1$, κ_i 和 κ_j 代表参数变量, 则特征值 (λ_k) 一阶与二阶灵敏度可以推导^[7]获得为

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial \kappa_i} = W_k^T \frac{\partial A}{\partial \kappa_i} U_k \quad (3a)$$

$$\frac{\partial^2 \lambda_k}{\partial \kappa_i \partial \kappa_j} = W_k^T \frac{\partial^2 A}{\partial \kappa_i \partial \kappa_j} U_k + \frac{\partial W_k^T}{\partial \kappa_i} \frac{\partial A}{\partial \kappa_j} U_k + \frac{\partial W_k^T}{\partial \kappa_j} \frac{\partial A}{\partial \kappa_i} U_k \quad (3b)$$

其中左特征向量 W_k^T 的偏导是所有特征向量的线性组和, 对一个有 n 个特征根的系统, 该偏导可以表述为:

$$\frac{\partial W_k^T}{\partial \kappa_i} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n \left(\frac{1}{\lambda_k - \lambda_m} W_k^T \frac{\partial A}{\partial \kappa_i} U_m W_m^T \right) \quad (4)$$

2 概率特征根分析

本文的目的是研究电力系统的多运行状态, 负荷的不确定性通过负荷曲线来描述, 从而可以求得负荷的均值与方差。所有的节点电压 (V), 节点注入 (S) 和特征根 (λ) 都被认为是随即变量, 本节目的是确定系统特征根的均值与方差。在一个 N 节点的系统, 当将实部与虚部分开写, 有个 $2N$ 电压变量, 节点注入 S 可以由这些变量的二阶函数来描述

$$S = G(V_1 V_1, \dots, V_1 V_j, \dots, V_{2N} V_{2N}) \quad (5)$$

由于 G 是二阶函数,

$$\bar{S} = G(\bar{V}_1 \bar{V}_1 + C_{V1,1}, \dots, \bar{V}_i \bar{V}_j + C_{V_i,j}, \dots, \bar{V}_{2N} \bar{V}_{2N} + C_{V_{2N},2N}) \quad (6)$$

其中: $C_{V_i,j} = \overline{\Delta V_i \Delta V_j}$, 是电压间的协方差。到此, 电压的均值与协方差仍然未知。然而, 正如前面所述, 阵中对应负荷的子矩阵的统计属性是知道的, 因此可以推导并求解出概率潮流公式 (6), 从而获得节点电压的均值与协方差。具体的方法如下, 将 \bar{V} 取一初值并代入公式 (6), 所得的结果 \bar{S} 与特解的差值定义为 $\Delta \bar{S}$, 可以写成如下公式:

$$\begin{cases} \Delta \bar{S} = J_V \Delta \bar{V} & (7a) \\ C_V = \Delta \bar{V} \Delta \bar{V}^T = J_V^{-1} \overline{\Delta S \Delta S^T} (J_V^1)^T = J_V^{-1} C_S (J_V^{-1})^T & (7b) \end{cases}$$

(7a) 用于计算 $\Delta \bar{V}$ 的修正量, (7b) 用于计算电压协方差矩阵 (节点注入的协方差 C_S 可以通过负荷变化曲线求得, J_V 是在 \bar{V} 处求得雅克比矩阵)。

这些值再代回公式(6),从而计算概率潮流程序,进行叠代,求得最后的概率潮流结果。

现在可以计算特征根的均值与协方差矩阵 C_λ 。如果 A 阵是线性系统动态方程的状态矩阵,则它的均值 \bar{A} 可以通过以下公式求得:

$$\bar{A} = \bar{A}_0 + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{2N,2N} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial V_i \partial V_j} \right) \Big|_{V=\bar{V}} C_{V_i, V_j} \quad (8)$$

$$C_\lambda = J_\lambda C_V J_\lambda^T \quad (9)$$

其中: \bar{A}_0 是在 \bar{V} 处求得的,而 J_λ 是特征根矩阵相对于电压 \bar{V} 的一阶偏导矩阵。

3 用于控制器定位和参数设计的概率灵敏度指标 PSIs

对于某个特征根 $\lambda_k = \alpha_k + j\beta_k$, λ_k 的期望和标准方差分别写成 $\bar{\alpha}_k$ 和 σ_{α_k} (σ_{α_k} 是公式(9)的对角阵的平方根)。 λ_k 在区域 $\{-\infty, \bar{\alpha}_k + 4\sigma_{\alpha_k}\}$ 的概率非常接近于 1——近 0.99996^[4]。这个分布区域的上限,写成 α_k' (如公式(10)所示),可以认为十多运行条件下用来衡量系统鲁棒稳定的新的阻尼系数,定义为扩展阻尼系数:

$$\alpha_k' = \bar{\alpha}_k + 4\sigma_{\alpha_k} \quad (10)$$

α_k' 相对于参数的灵敏度系数 κ 表明该参数对 α_k' 调节的有效程度,也表明正确的调节方向,从而提高系统阻尼。因此公式(11)定义的特征根灵敏度指标 PSIs 可以用来做控制器参数的设计。

$$S_{\alpha_k', \kappa} = \frac{\partial \alpha_k'}{\partial \kappa} = \frac{\partial \bar{\alpha}_k}{\partial \kappa} + 4 \frac{\partial \sigma_{\alpha_k}}{\partial \kappa} \quad (11)$$

在传统的阻尼控制器设计方法(只考虑某个运行点的情况下)里,阻尼控制器的定位于信号选择可以通过开环模式下的留数指标获得^[2]。但仅考虑一个反馈时,实际上留数指标等价于阻尼控制器在增益等于零时求得的特征根灵敏度系数^[9]。在多运行条件下,当由公式(10)来确定小干扰稳定性时,阻尼控制器增益等于零时对应的概率特征根灵敏度 PSI 可以看成是传统的留数指标在概率情况下的扩展,因此可以被用来确定控制器的安装位置和输入信号。

$$S_{\alpha_k', G} \Big|_{G=0} = \frac{\partial \alpha_k'}{\partial G} \Big|_{G=0} \quad (12)$$

公式(11)、(12)中的 $\bar{\alpha}_k$ 灵敏度可以通过公式(3a)获得,这跟传统的特征根灵敏度方法类似^[15-18],但 σ_{α_k} 的灵敏度需要通过公式(3b)的二

阶灵敏度求得。

为了计算 σ_{α_k} 的概率灵敏度,特征根 λ_k 的协方差 C_{α_k, α_k} , C_{α_k, β_k} , C_{β_k, α_k} 和 C_{β_k, β_k} 可以通过公式(7b)的 C_V 求得,求解方法如公式(13)所示,其中 (γ_k, η_k) 代表 α_k 和 β_k 的四个组合。

$$C_{\gamma_k, \eta_k} = \sum_{j=1}^{N,N} \left(\frac{\partial \gamma_k}{\partial V_i} \frac{\partial \eta_k}{\partial V_j} C_{V_i, V_j} \right) \quad (13)$$

根据公式(13),协方差相对于控制器参数 κ 的灵敏度可以表达为

$$\frac{\partial C_{\gamma_k, \eta_k}}{\partial \kappa} = \sum_{i,j=1}^{N,N} \left[C_{V_i, V_j} \left(\frac{\partial^2 \gamma_k}{\partial V_i \partial \kappa} \frac{\partial \eta_k}{\partial V_j} + \frac{\partial \gamma_k}{\partial V_i} \frac{\partial^2 \eta_k}{\partial V_j \partial \kappa} \right) \right] \quad (14)$$

考虑到 $\sigma_{\alpha_k}^2 = C_{\alpha_k, \alpha_k}$ 和 $\gamma_k = \eta_k = \alpha_k$, 标准方差 σ_{α_k} 的灵敏度可以通过公式(15)求得。

$$\frac{\partial \sigma_{\alpha_k}}{\partial \kappa} = \frac{1}{2\sigma_{\alpha_k}} \frac{\partial C_{\alpha_k, \alpha_k}}{\partial \kappa} \quad (15)$$

在公式(13)、(14)和(15)中,特征根对节点电压的一阶灵敏度可以由公式(3a)获得,通过将(3a)里的 κ_i 换成 V_i 或 V_j 。特征根对节点电压和 SVC 控制器参数 κ 的二阶灵敏度(14)可以根据公式(3b)计算,其中 κ_i 替换成 V_i 或 V_j , κ_j 替换成 κ 。

4 算例分析

本文采用的算例是一个两区域,含四台发电机的系统,如图1所示。发电机1与2装有快速励磁,发电机3与4装有慢速励磁。发电机及网络数据同文献[1]。在本研究中,负荷的概率曲线如图3所示,发电机的节点电压的变化采用图4所示曲线。在假设正态分布的情况下,节点功率与 PV 母线电压的正常运行值取他们的均值,如下:

$$\begin{aligned} S_{L6} &= 9.8 + 1 \text{ pu}, S_{L7} = 16.48 + 1 \text{ pu} \\ P_{G1} &= 6.6 \text{ pu}, P_{G2} = 6.1 \text{ pu}, P_{G3} = 6 \text{ pu} \\ V_{G1} &= 1.02(\text{pu}), V_{G2} = 1.01(\text{pu}) \\ V_{G3} &= 1.03(\text{pu}), V_{G4} = 1.01 \angle 0^\circ(\text{pu}) \end{aligned}$$

该系统的这些运行状态的统计属性通过第三节所介绍的概率特征根求得。表1列出了复特征根的概率结果(为了简化,具有足够稳定性的实特征根没有列出)。对特征根期望值的模式分析^[18]表明本

系统有三个机电模式, 即特征根 3 到 5, 其中特征根 3 与 4 分别是两个区间里的区内振荡, 而特征根 5 是区间振荡。该区间振荡的阻尼常数 α 小于零的概率只有 0.359, 所以阻尼不足。因此选择安装 SVC 来改善该区间振荡的阻尼。本节将讨论 SVC 安装位置及输入信号的选择, SVC 阻尼控制器参数的设计, 从而实现鲁棒的阻尼控制。

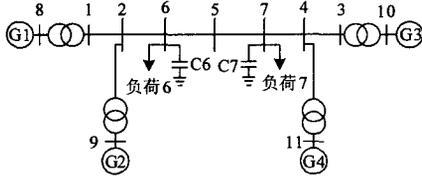


图 1 算例系统
Fig.1 Test system

4.1 SVC 安装位置及输入信号的选择

本研究中采用的 SVC 结构如图 2 所示^[8], SVC 由晶闸管控制的电抗器, 及固定电容器组成, 并通过降压变压器与母线相连, 其中 X_T 是变压器的阻抗, B_C 和 B_L 分别是电容器与电感器的电纳。由于电压调节器所能提供的阻尼力矩很小, 所以 SVC 需要辅助的阻尼控制器。

表 1 未加装 SVC 时系统复特征根

Tab.1 Complex eigenvalues without SVC

编号	$\bar{\alpha}$	$\bar{\beta}$	σ_α	P_α	振荡模式
1	-18.670	7.955	0.026	1.000	
2	-18.550	7.194	0.003	1.000	
3	-0.537	6.344	0.138	1.000	G3—G4
4	-0.555	5.979	0.078	1.000	G1—G2
5	0.076	3.074	0.207	0.359	区间
6	-1.066	2.600	0.232	1.000	
7	-0.494	0.884	0.029	1.000	
8	-0.755	0.730	0.057	1.000	
9	-5.631	0.712	0.043	1.000	
10	-0.461	0.433	0.072	1.000	

注: 特征根期望: $\bar{\lambda} = \bar{\alpha} \pm j\bar{\beta}$, 标准方差: σ_α , 概率: $P_\alpha = P[\alpha < 0]$

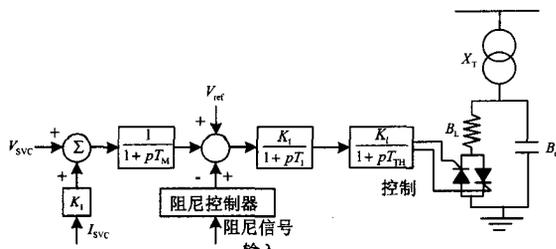


图 2 SVC 的结构图

Fig.2 Configuration of the SVC

如算例系统图 1 所示, 任何母线都可以选为 SVC 的安装位置, 但由于线路 6-5-7 是联络线, 所安装的 SVC 用来改善区间震荡模式的阻尼, 所以母线 5, 6, 7 作为 SVC 的备选安装位置, 就地测量的联络线信号 (电流、有功功率、无功功率以及复功率) 可作为阻尼控制器的输入信号。当 SVC 安装在不同的位置, 输入不同的信号时, 控制器增益所对应的概率灵敏度指标 PSIs 可以计算求得。幅值最大的 5 个概率灵敏度指标 PSIs 如表 2 所示, 其中最大的 PSI 是 1.105 0, 因此母线 7 是最好的 SVC 安装位置, 线路 7-4 上的有功功率是最合适的输入信号。

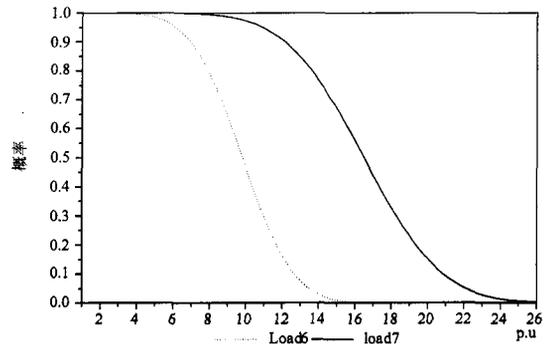


图 3 负荷曲线

Fig.3 Load duration curves

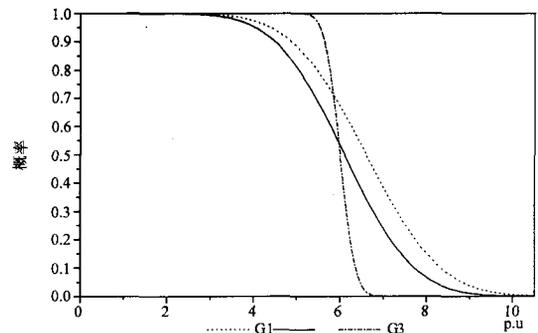


图 4 发电机输出有功功率曲线

Fig.4 Output power curves of generators

4.2 控制器参数的确定

本研究采用的是含有两个超前滞后环节结构的阻尼控制器:

$$F(s) = G \frac{sT_w}{1+sT_w} \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \frac{1+sT_3}{1+sT_4} \quad (16)$$

其中: G 是 SVC 控制器的增益, T_w 是隔直环节, T_1/T_2 以及 T_3/T_4 是超前滞后环节的时间常数。设一参数向量 K 包含该控制器的所有参数 G, T_1, T_2, T_3 和 T_4 , 一实数向量 D 包含所有欠/弱阻尼的阻尼

常数 α' ，则两者的关系可以表述为：

$$\Delta D = J \Delta K \quad (17)$$

其中： J 是由PSIs S'_α 组成的概率特征根灵敏度矩阵。

阻尼控制器的参数可以按下述步骤获得：

- a) 确定构成向量 D 的相关的阻尼常数。
- b) 计算相关的 PSIs，从而根据式 (11) 形成 J 矩阵。
- c) 为矩阵 K 选择合适的 SVC 参数数目，使得它的维数与矩阵 D 相同， J 是一个方阵。
- d) 根据公式(17)，调节 K 阵里的参数从而改善 D 阵里的相应特征根。
- e) 如果所有的阻尼常数满足($\alpha' > 0$)，则结束；否则修改矩阵 K ，重复步骤 a) 到 d)。

表 2 控制器增益所对应的概率灵敏度指标 PSIs
(在多种输入信号，多个位置处)

Tab.2 PSI of controller gain for different feedback signals and locations

位置	输入信号	PSI
节点 7	ΔP_{74}	1.105 0
节点 7	ΔS_{74}	-1.101 0
节点 7	ΔI_{74}	-0.952 8
节点 6	ΔP_{62}	-0.898 7
节点 6	ΔS_{62}	0.892 4

注： ΔP ， ΔS 和 ΔI 分别代表线路上的有功功率，复功率和电流增量。例： ΔP_{74} 代表从节点 7 到节点 6 的有功功率。

表 3 安装 SVC 后的复特征根

Tab.3 Complex eigenvalue with SVC

No	$\bar{\alpha}$	$\bar{\beta}$	σ_α	P_α	模式
1	-18.664	7.962	0.024	1.000	
2	-18.557	7.195	0.034	1.000	
3	-0.530	6.412	0.148	1.000	G3--G4
4	-0.553	5.978	0.079	1.000	G1--G2
5	-0.159	3.688	0.038	1.000	区间
6	-0.853	2.596	0.105	1.000	
7	-0.494	0.883	0.028	1.000	
8	-0.859	0.835	0.112	1.000	
9	-5.631	0.712	0.043	1.000	
10	-0.462	0.435	0.070	1.000	
11	-0.186	0.029	0.005	1.000	新
12	-20.55	15.904	0.975	1.000	新

注：表 1 里没有表 3 里出现的新特征根 11，12

对于本算例，求得控制器的最后参数为 $T_w = 6$ s， $T_1 = 0.08$ s， $T_2 = 0.02$ s， $T_3 = 4.6$ s， $T_4 = 5.4$ s， $G = -0.0111$ 。闭环系统的所有复特征根如表 3 所示，都满足鲁棒稳定性。与表 1 中的原始特征根对比，区间振荡的阻尼得到很好的改善。

5 结论

本文将概率理论应用于特征根灵敏度分析和 SVC 的阻尼控制器设计，以克服传统设计方法的鲁棒问题。在本文所介绍的方法里，特征根由它的希望与方差表述，因此特征根的鲁棒稳定性由它的分布极限决定。基于这个极限的灵敏度，构造了概率灵敏度系数，并被用于 SVC 定位、输入信号的选择及阻尼控制器参数的确定。所设计鲁棒控制器的有效性通过两机四母线系统可以验证。然而，在本项目的概率法研究中，系统的不确定性仅考虑了节点负荷的变化，并没有考虑其他因素，如发电机的输出和网络结构/参数的变化。另外，还假设了负荷的变化具有独立性，发电机的饱和也没有考虑。下一步工作需要研究解决这些局限。

参考文献

- [1] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, Inc., 1993.
- [2] Wang I, Chung C Y. Increasing Power Transfer Limits at Interfaces Constrained by Small-signal Stability[A]. in: IEEE PES Winter Meeting Panel Session on Recent Applications of Small Signal Analysis Techniques[C]. New York: 2007.
- [3] Yu X C, Khammash M, Vittal V J. Robust Design of a Damping Controller for Static Var Compensators in Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006:456-462.
- [4] Chung C Y. Power System Stability Enhancement Employing Controllers Based on a Versatile Modeling Thesis[D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 1999.
- [5] Hauth R L, Humann I, Newell R J. Application of a Static Var System to Regulate System Voltage in Western Nebraska[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1978, 97:1955-1964.
- [6] de Oliveira S E M. Synchronizing and Damping Torque Coefficients and Power System Steady-state Stability as Affected by Static Var Compensators[J]. IEEE Trans Power Systems, 1994,(9):109-119.
- [7] Padiyar K R, Varma R K. Damping Torque Analysis of Static Var System Controllers[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991,(6):458-165.

(下转第 78 页 continued on page 78)

电压约为 50 V, 发单相失地信号。

4.5 断线处导线的电源端落地、负荷端悬空且负荷端变压器投入

断线处导线的电源端落地、负荷端悬空且负荷端变压器投入, 如图 4(e), 这种情况负荷端母线三相电压指示如下: 断线相互感器励磁电源为 1.5 倍的相电压, 其相电压读数为 1.5 倍的相电压值; 其它正常相的相电压升高为线电压, 造成二次电势不对称。与断线相有关的线电压读数为 0.5 倍的线电压值, 与断线相无关的线电压不变。二次系统的开口三角电压约为 150 V, 发单相失地信号。

以上分析结果见表 1。

5 技术措施

从分析结果可知, 要准确地判定故障类型, 变电站的后台或调度监控应能测量系统三相的相电压、线电压和馈线的三相(二相)相电流、零序电流。这对日益普及的变电站综合自动化系统来说, 已不需增加硬件设备, 只需在变电站的后台或调度监控电脑的主接线图中加入前述的各测量量, 即可满足非短路故障判别的需求。

6 结论

通过对单相失地、电压互感器熔丝熔断、铁磁谐振、单电源线路断线等故障的负荷电流和馈线的零序电流及母线相电压、线电压、零序电压五个量进行定性与定量分析, 得出各类非短路故障的判别方法。变电站的后台或调度监控能测量系统三相的相电压、线电压和馈线的三相(二相)相电流、零序电流, 可提高处理这些故障的准确性和及时性, 减少因前述故障造成的人身和设备事故。

参考文献

[1] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:水利电力出版社, 1985.

[2] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京:电力工业出版社, 1981.

收稿日期: 2008-10-29; 修回日期: 2008-12-20

作者简介:

余水忠(1967-), 男, 本科, 从事电力网运行管理工作;

E-mail: ysz2468@163.com

潘 兰(1967-), 女, 本科, 从事电力网运行管理工作。

(上接第 22 页 continued from page 22)

[8] Chung C Y, Tse C T, Wang K W, et al. Synthesis of Sensitivity Coefficients for Controller Parameters of Static Var Compensator[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 2000, 147(4):223-230.

[9] El-Sadek M Z, I-Saady G U, Abo-El-Saud M. A Variable Structure Adaptive Neutral Network Static Var Controller[J]. Electric Power System Research, 1998, 45(2):109-117.

[10] Zhang Y, Malik O P, Hope G S, et al. Application of Inverse Input Output Mapped ANN as a Power System Stabilizer[J]. IEEE Trans, 1994, 9(3):433-441.

[11] Chung C Y, Tse C T, David A K, et al. Partial Pole Placement of H_∞ Based PSS Design Using Numerator Denominator Perturbation Representation[J]. IEE Proceedings Gener, Transm, and Distrib, 2001, 148(5): 13-419.

[12] Burchett R C, Heydt G T. Probabilistic Methods for Power System Dynamic Stability Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1978, 97(3):695-702.

[13] Brucoli M, Torelli F, Trovato. Probabilistic Approach for Power System Dynamic Stability Studies[J]. IEE Proc-Gener Transm and Distrib, 1981, 28(5):295-301.

[14] Wang K W, Tse C T, Tsang K M. Algorithm for Power System Dynamic Stability Studies Taking Account the Variation of Load Power[J]. International Journals of Electric Power Systems Research, 1998, 46: 221-227.

[15] Wang K W, Chung C Y, Tse C T, et al. Multimachine Eigenvalue Sensitivities of Power System Parameters[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2).

[16] Chung C Y, Wang K W, Tse C T. Selection of the Location And Damping Signal for Static Var Compensator by Versatile Modeling[J]. International Journals of Electric Power System Research, 2006, 53(1):7-14.

[17] Hussein M Z E, Alden R T H. Second Order Eigenvalue Sensitivities Applied to Power System Dynamics[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(6):1928-1936.

[18] Tse C T, Tso S K. Design Optimisation of Power System Stabilisers Based on Modal and Eigen-sensitivity Analyses[J]. IEE Proc Gener, Transm, and Distrib, 1998, 135(5):406-415.

收稿日期: 2008-11-24; 修回日期: 2009-02-20

作者简介:

边晓燕(1976-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统稳定、控制、风力发电; E-mail: kuliz@163.com

周歧斌(1977-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为雷电防护与电磁兼容;

王克文(1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制。