

基于 GMR 技术确定电压弱节点的特征根灵敏度指标

宗秀红, 张尧, 董泰福

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 一般性的多机系统表达 (GMR) 技术能够简单快速地形成系统的状态矩阵, 从而方便地计算系统的特征根及特征根灵敏度。基于 GMR 技术, 分别给出了两种确定系统电压弱节点 (或无功补偿点) 的特征根灵敏度指标, 即特征根的无功灵敏度指标和导纳灵敏度指标。根据该灵敏度指标可以有效地选择系统的电压薄弱点, 进行节点电压控制。并在五节点的系统上进行了计算分析, 结果表明在该特征根灵敏度指标所确定的电压弱节点进行无功补偿可以得到最佳的补偿效果。

关键词: 电压稳定; 无功补偿; 特征根; 灵敏度

中图分类号: TM74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897 (2006) 18-0035-05

0 引言

电压稳定是近年来电网安全运行中出现的新问题。由无功功率与电压之间的强联系, 系统的无功功率对电压稳定性有着直接的影响。随着电力系统用电负荷增长以及远距离大容量输电引起的无功功率损耗的增加, 加强对无功补偿的研究尤为重要。

为使无功补偿得到最佳效果, 对无功补偿装置的配置要进行合理的选址。文献 [1] 提出了一种基于潮流追踪、辨别关键路径的方法确定加装无功补偿装置的地点; 文献 [2] 指出用系统的电压弱节点作为无功补偿点; 文献 [3] 采用切向量法确定电压弱节点; 文献 [4] 采用阻尼牛-拉法寻找系统的电压薄弱点; 文献 [5] 则给出了以潮流雅可比矩阵最小模特征值对应的左特征向量作为节点电压对无功功率变化的灵敏度指标, 从而确定电压的薄弱点。以上方法均基于系统的潮流方程, 没有计及系统的动态特性。

电压稳定问题本质上是一个动态问题, 系统中的诸多动态因素如发电机及其励磁控制系统等对电压稳定性均有重要影响, 只有在动态分析下, 这些影响才能充分体现。基于状态变量的特征根分析法是研究动态稳定的基本方法。电力系统的稳定性分功角稳定和电压稳定, 如果特征根的机电回路相关比很大, 由此模式导致系统失稳时为功角型失稳; 否则为电压型失稳, 特别是正实特征根, 将导致节点电压单调下降失稳。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50337010)

在特征值分析中, 为形成状态空间表达, 提出过许多方法^[6~8], 这些方法都是根据系统线性化后的微分方程和代数方程, 直接建立表征系统特性的系数矩阵, 然后消去非状态变量来获得全系统状态方程, 直观性好, 但过程相当复杂。

文献 [9] 提出了一般性的多机系统表达 (GMR), 将电力网络的微分方程和构成网络的装置的微分方程转换成单元块, 从而与控制器单元块可方便地结合起来。GMR 简化了特征根的灵敏度表达。

考虑系统的动态模型, 本文在 GMR 技术的基础上, 给出了新的确定系统电压弱节点 (或无功补偿点) 的特征根灵敏度指标。

1 一般性的多机系统表达

1.1 状态空间方程^[9]

GMR 表达中, 只含有如图 1 的两类基本传输块。

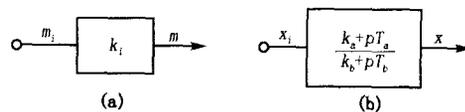


图 1 基本传输块

Fig 1 Elementary transfer blocks representation

将电力系统的传输结构用这两类基本块描述, 可形成如下关系式

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_4 & L_5 & L_6 \\ L_7 & L_8 & L_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ R \\ M \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: X 是系统的状态变量列向量; L_7 和 L_9 是节点电压的函数。L 的形成详见附录 1。

基于图 1 (b) 的一阶传函和微分方程之间的关

系,可形成系统的状态方程(详见附录2)

$$\dot{X} = AX + BR + ER \quad (2)$$

小干扰稳定性分析中,通常不考虑系统的外界输入项 $R^{[10]}$,系统的状态方程可简单描述为

$$\dot{X} = AX \quad (3)$$

$$\text{式中: } A = S(K_a F - K_b) \quad (4)$$

$$S = (I - K_i F)^{-1} \quad (5)$$

$$F = L_1 + L_3 H L_7 \quad (6)$$

$$H = -L_9^{-1} \quad (7)$$

2 特征根的灵敏度表达^[11]

2.1 一般性灵敏度表达

设系统特征值 λ_k 的左右特征向量分别是 W_k 和 U_k ,且 $W_k^T U_k = 1$ 。 K_i 为任意参数,则特征根对参数 K_i 的一阶灵敏度可表达为

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial K_i} = W_k^T \frac{\partial A}{\partial K_i} U_k \quad (8)$$

GMR中, K_a , K_b 和 K_i 包含了所有的一阶块参数, L_7 和 L_9 包含了所有的零阶块参数。由 $SS^{-1} = 1$,则 $\frac{\partial S}{\partial K_i} = S K_i \frac{\partial F}{\partial K_i} S$,结合式(4)~(7)的具体表达,状态矩阵 A 对 K_i 的一阶灵敏度可表达为

$$\frac{\partial A}{\partial K_i} = S K_i \frac{\partial F}{\partial K_i} A + S K_i \frac{\partial F}{\partial K_i} \quad (9)$$

$$\frac{\partial F}{\partial K_i} = L_3 H \left[\frac{\partial L_9}{\partial K_i} H L_7 + \frac{\partial L_7}{\partial K_i} \right] \quad (10)$$

2.2 子矩阵 L_7 和 L_9 的灵敏度

L_7 和 L_9 均为节点电压 V 的函数, L_9 又是网络参数 Y 的函数。但 L_7 和 L_9 均不显含系统的运行参数,因此在计算 L_7 和 L_9 的一阶灵敏度时,按照复合函数求导的原则有

$$\frac{\partial L_9}{\partial K_i} = \frac{\partial L_9}{\partial V} \frac{\partial V}{\partial K_i} + \frac{\partial L_9}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial K_i} \quad (11)$$

$$\frac{\partial L_7}{\partial K_i} = \frac{\partial L_7}{\partial V} \frac{\partial V}{\partial K_i} \quad (12)$$

其中:当 K_i 为系统的运行参数时, $\partial Y / \partial K_i = 0$ 。

式(1)中的 L_1 、 L_3 、 L_7 和 L_9 高度稀疏,故可以采用稀疏技术,大大减少了计算存储量,但是各非零元素在 L_7 和 L_9 的位置需加以识别。

2.3 节点电压对运行参数的灵敏度

$$\text{记节点功率方程 } P_i + jQ_i = V_i \sum_j Y_{ij} V_j$$

$$S_{LV} = S_{YV} \quad (13)$$

式中: S_{LV} 是包含 PV 节点电压和节点注入功率的扩

展向量,且负荷采用电压依赖指数模型;下标 L 表示负荷, V 表示 S_{LV} 和 S_{YV} 是节点电压的函数。节点电压采用直角坐标形式 $V = [V_1, V_2, \dots, V_{2N}]^T$, S_{YV} 可表达为节点电压的二次函数^[12]

$$S_{YV} = F(Y, V_1 V_1, \dots, V_m V_m, \dots, V_{2N} V_{2N}) \quad (14)$$

式中: $F(\cdot)$ 是函数向量。节点电压 V 对运行参数 K_i 的灵敏度可由式(13)和(14)获得,并可表达为:

$$\frac{\partial V}{\partial K_i} = - (J_L - J_0)^{-1} \frac{\partial S_{LV}}{\partial K_i} \quad (15)$$

式中: J_0 和 J_L 分别为 S_{YV} 和 S_{LV} 的雅可比矩阵。

2.4 节点电压对网络参数的灵敏度

设 i 为节点 m 和 n 之间的一个网络参数,记

$$\dot{Y} = \partial Y / \partial i \quad (16)$$

则当 $m \neq n$ 时, \dot{Y} 有四个非零元素, $m = n$ 时, \dot{Y} 仅有一个非零元素。

将式(13)对 i 进行微分可得

$$\frac{\partial V}{\partial i} = J^{-1} S_{YV} \quad (17)$$

式中: $J = J_L - J_0$; S_{YV} 与 S_{YV} 表达式相同,只需将式(14)中的 Y 用 \dot{Y} 代替即可。显然 S_{YV} 的非零元素个数不超过四个。

3 确定电压弱节点的灵敏度指标

3.1 无功灵敏度指标

在小干扰电压稳定性分析中,特征根对节点注入无功功率的灵敏度表征了该节点无功功率发生变化时对相应特征根的影响。由无功功率与节点电压之间的强相关性,表征系统电压不稳定的特征根对节点注入无功功率的灵敏度可作为系统无功补偿点的选择依据,也即电压弱节点的判据。

基于前面所述的 GMR 技术,设 λ_k 为表征系统电压不稳定的特征根,则该特征根对节点 i 的节点注入无功功率的灵敏度指标为

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial Q_i} = W_k^T \frac{\partial A}{\partial Q_i} U_k \quad (18a)$$

状态矩阵 A 不显含节点注入功率 Q_i ,但 Q_i 可以表示成节点电压 V 的函数,故式(18a)可表达为

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial Q_i} = \sum_{j=1}^{2N} \frac{\partial \lambda_k}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial Q_i} = \frac{\partial \lambda_k}{\partial V} \frac{\partial V}{\partial Q_i} \quad (18b)$$

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial V_j} = W_k^T \frac{\partial A}{\partial V_j} U_k \quad (18c)$$

$$\frac{\partial A}{\partial V_j} = S K_i \frac{\partial F}{\partial V_j} A + S K_i \frac{\partial F}{\partial V_j} \quad (18d)$$

$$\frac{\partial F}{\partial V_j} = L_3 H \left[\frac{\partial L_9}{\partial V_j} H L_7 + \frac{\partial L_7}{\partial V_j} \right] \quad (18e)$$

令 $Q = [Q_1, Q_2, \dots, Q_N]$, 则特征根对节点注入无功功率的灵敏度指标可表达为

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial Q} = \frac{\partial \lambda_k}{\partial V} \frac{\partial V}{\partial Q} \quad (19a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial Q} = -(J_L - J_0)^{-1} \frac{\partial S_{LV}}{\partial Q} \quad (19b)$$

3.2 导纳灵敏度指标

无功补偿的方式很多,其中并联电容器组是一种简单而又方便的无功补偿装置,其原理是通过改变节点的自导纳,从而改变系统的节点注入无功功率,进而改善系统的电压水平。因此,系统的电压薄弱点又可通过改进的导纳灵敏度指标来确定。

由于 L_9 既是节点电压的函数又是节点导纳的函数,特征根亦可表达为节点电压和节点导纳的函数 $\lambda_k = g(Y, V)$ 。设 λ_k 为表征系统电压不稳定的特征根,则该特征根对节点自电纳 B_{ii} 的灵敏度指标为

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial B_{ii}} = \frac{\partial g_k}{\partial B_{ii}} + \frac{\partial g_k}{\partial V} \frac{\partial V}{\partial B_{ii}} \quad (20a)$$

$$\frac{\partial g_k}{\partial B_{ii}} = W_k^T \frac{\partial A}{\partial B_{ii}} U_k \quad (20b)$$

$$\frac{\partial A}{\partial B_{ii}} = S K_i \frac{\partial F}{\partial B_{ii}} A + S K_a \frac{\partial F}{\partial B_{ii}} \quad (20c)$$

$$\frac{\partial F}{\partial B_{ii}} = L_3 H \frac{\partial L_9}{\partial B_{ii}} H L_7 \quad (20d)$$

$$\frac{\partial g_k}{\partial V} = W_k^T \frac{\partial A}{\partial V} U_k \quad (20e)$$

$$\frac{\partial V}{\partial B_{ii}} = (J_L - J_0)^{-1} \frac{\partial S_{LV}}{\partial B_{ii}} \quad (20f)$$

其中 L_7 对网络参数的灵敏度为零,故式 (20d) 简化为一项,且 L_9 对 B_{ii} 的灵敏度只有一个非零元素。

表征系统电压不稳定的特征根对节点注入无功功率的灵敏度或对节点电纳的灵敏度最大,该节点即为系统的电压弱节点,或最佳无功补偿点。

在常规的小干扰特征根分析中,形成系统的状态矩阵已经相当繁琐,更不用说计算系统的特征根灵敏度了。基于 GMR 技术,将所有的元件均表达成零一阶传输块的形式后,程序可自动形成系统的状态矩阵,且不受系统元件个数多少的限制,这使得基于 GMR 技术确定系统电压弱节点的特征根灵敏度指标计算简单方便,且稀疏技术的采用大大减少了存储量和计算量。

4 算例分析

本文对图 2 所示的五节点系统进行了计算分

析,支路数据如表 1。稳态运行的负荷功率和 PV 节点电压作相应量的均值用。 $S_{L1} = 1.2 + j1.0$ (pu), $S_{L2} = 2.0 + j1.0$ (pu), $S_{L3} = 2.0 + j1.0$ (pu), $P_{G1} = 3.0$ (pu), $Q_{G1} = 1.2$ (pu), $V_{G2} = 0.98 + j0$ (pu)。考虑负荷的静态电压特性^[13]: $P_L = P_{L0} V^a$, $Q_L = Q_{L0} V^b$, 其中, $a = 1.38$, $b = 3.22$ 。发电机采用三阶模型, G_2 为参考发电机,发电机的参数如表 2。

系统产生 5 个特征根如表 3 所示,其中一零特征根 (由于没有考虑无穷大母线) 没有列出。表 3 的第四列为特征根的机电回路相关比。由表 3,特征根 λ_4 为实特征根,且 λ_4 位于复平面的右半平面,其机电回路相关比远小于 1.0,由该特征根导致系统失稳时属于电压型失稳。

特征根 λ_4 对节点注入无功功率的灵敏度及其对节点电纳的灵敏度分别如表 4 和表 5 所示。由于节点 5 为参考发电机节点,这里没有考虑特征根对该节点参数的灵敏度。

由表 4,特征根 λ_4 对节点 1 的注入无功功率的灵敏度最大;由表 5, λ_4 对节点 1 的节点电纳的灵敏度也最大,故节点 1 为系统的电压弱节点。根据无功功率与节点电压的强相关性,在节点 1 进行无功补偿将最有效。

为验证该结果的正确性,在节点 1~4 分别加装电容器进行无功补偿,其中 $C = 0.6$,在不同节点进行无功补偿时特征根 λ_4 的变化如表 6。由表 6,在节点 1 进行无功补偿时,补偿后的 λ_4 位于复平面的最左边,这说明在该节点无功补偿的效果最好,从而也验证了用特征根对节点无功功率注入的灵敏度和特征根对节点电纳的灵敏度作为系统电压弱节点或者无功补偿点的灵敏度指标判据是正确的。

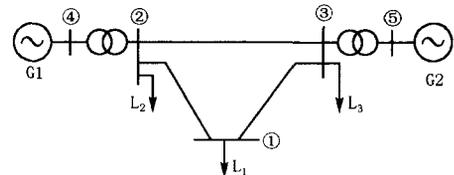


图 2 五节点系统

Fig 2 Five-bus system

表 1 5 节点系统支路数据

Tab 1 Branch data for the five-bus system

| 始节点 i | 末节点 j | X /pu | $B/2$ /pu | T |
|---------|---------|---------|-----------|-----|
| 1 | 2 | 0.35 | 0.2 | — |
| 1 | 3 | 0.35 | 0.2 | — |
| 2 | 3 | 0.2 | 0.0 | — |
| 2 | 4 | 0.015 | — | 1.0 |
| 3 | 5 | 0.015 | — | 1.0 |

表 2 三阶发电机参数

Tab 2 Parameters of three-order generator model

| | R_a /pu | X_d /pu | X_q /pu | X_d' /pu | T_{d0} | M | D |
|----|-----------|-----------|-----------|------------|----------|--------|-------|
| G1 | 0.000 | 1.633 | 1.633 | 0.179 | 4.000 | 2.620 | 0.000 |
| G2 | 0.000 | 0.306 | 0.306 | 0.048 | 6.200 | 19.600 | 0.000 |

表 3 系统特征根

Tab 3 Eigenvalues for the system

| 特征根编号 i | i | i | i |
|-----------|----------|------|---------|
| 1, 2 | -0.579 5 | 8.61 | 14.9 |
| 3 | -0.376 3 | — | 0.001 |
| 4 | 0.007 2 | — | 0.000 2 |

表 4 特征根对节点注入无功功率的灵敏度

Tab 4 Sensitivities of eigenvalue to nodal reactive

| 特征根编号 i | 灵敏度 | | | |
|-----------|---------|---------|---------|---------|
| | Q_1 | Q_2 | Q_3 | Q_4 |
| 4 | 3.969 2 | 1.693 3 | 0.210 2 | 2.429 0 |

表 5 特征根对节点电纳的灵敏度

Tab 5 Sensitivities of eigenvalue to nodal reactive

| 特征根编号 i | 灵敏度 | | | |
|-----------|----------|----------|----------|----------|
| | B_{11} | B_{22} | B_{33} | B_{44} |
| 4 | 1.615 1 | 1.018 7 | 0.222 2 | 1.522 5 |

表 6 具有无功补偿的特征根

Tab 6 Eigenvalues with reactive power compensation

| 补偿点 i | i | i |
|---------|----------|-----|
| 1 | -0.203 5 | — |
| 2 | -0.197 5 | — |
| 3 | -0.055 3 | — |
| 4 | -0.201 0 | — |

5 结论

基于 GMR 技术,给出了确定系统电压弱节点的特征根灵敏度指标,与常规的小干扰特征根分析比较,该特征根灵敏度指标计算方便,不受系统元件个数的限制,且可采用稀疏技术大大节省存储空间和计算时间。在五节点系统上进行的计算分析表明采用该特征根灵敏度指标确定系统的电压弱节点是正确的,在所确定的电压弱节点进行无功补偿将最有效。

附录

1 关联矩阵 L 的形成^[9]

当所有发电机以及与其相连的控制系统均用图 1 所示的两类基本块描述时,为了描述各传输块之间的关系,可形成如下关联矩阵 L

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_0 \\ M_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_4 & L_5 & L_6 \\ L_7 & L_8 & L_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ R \\ M \end{bmatrix} \quad (A-1a)$$

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_0 \\ M_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_4 & L_5 & L_6 \\ L_7 & L_8 & L_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ R \\ M \end{bmatrix} \quad (A-1b)$$

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_0 \\ M_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_4 & L_5 & L_6 \\ L_7 & L_8 & L_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ R \\ M \end{bmatrix} \quad (A-1c)$$

式中: X_i 和 X 分别是表达所有一阶块的输入和输出的向量; M_i 和 M 分别是表达所有零阶块的输入和输出的向量; Y_0 是系统的输出向量; R 是外加的系统输入向量,如阶跃输入或冲击输入等。在一般的小干扰稳定性分析中, R 通常为零。其中 L_1 和 L_3 分别为描述一阶块输入与一阶块输出和一阶块输入与零阶块输出的关联矩阵,其元素为“1”或“0”; L_7 和 L_9 分别描述了一阶块与零阶块和零阶块与零阶块之间的代数关系,它们都是节点电压的函数。

对图 1(a)的零阶块有

$$m = k_i m_i \quad (A-2)$$

设 K 是表达所有零阶块参数的对角阵,则

$$M = KM_i \quad (A-3)$$

将式 (A-2) 代入式 (A-3) 得

$$M = KM_i = KL_7 X + KL_8 R + KL_9 M =$$

$$L_7 X + L_8 R + L_9 M \quad (A-4a)$$

即

$$0 = L_7 X + L_8 R + L_9 M \quad (A-4b)$$

式中: $L_9 = L_9 - I = KL_9 - I$, 其中 I 是单位矩阵。从而可得式 (1) 的关系式。

2 状态方程的形成

类似式 (A-2), 对于图 1(b) 的一阶块有

$$x = \frac{k_a + pT_a}{k_b + pT_b} x_i \quad (A-5)$$

$$px = -\frac{k_b}{T_b} x + \frac{k_a}{T_a} x_i + \frac{T_a}{T_b} (px_i) - K_b x + K_a x_i + K_i (px_i) \quad (A-6)$$

式中: $K_a = \frac{k_a}{T_b}$, $K_b = \frac{k_b}{T_b}$, $K_i = \frac{T_a}{T_b}$; p 是微分算子。

设 K_a 、 K_b 和 K_i 分别是表达所有一阶块中 K_a 、 K_b 和 K_i 的对角阵,则有

$$\dot{X} = -K_b X + K_a X_i + K_i X_i \quad (A-7)$$

式 (1a) 和 (1c) 又可分别写为

$$X_i = L_1 X + L_2 R + L_3 M \quad (A-8)$$

$$M = -L_9^{-1} (L_7 X + L_8 R) \quad (A-9)$$

将式 (A-8) 和 (A-9) 代入 (A-7) 可得状态方程式 (2)。

参考文献:

[1] 陈兴华, 张尧, 武志刚. 基于关键路径确定无功补偿装置配置地点的改进算法 [J]. 电网技术, 2004, 28(2): 53-56
CHEN Xing-hua, ZHANG Yao, WU Zhi-gang An Improved Algorithm for Allocation of Reactive Compensation Devices Based on Key Paths [J]. Power System Technol-

- ogy, 2004, 28(2): 53-56
- [2] Chen Y L. Weak Bus Oriented Reactive Power Planning for System Security[J]. IEE Proc—Gener, Transm, and Distrib, 1996, 143(6): 541-545.
- [3] de Souza A C Z. Tangent Vector Applied to Voltage Collapse and Loss Sensitivity Studies [J]. Electric Power System Research, 1998: 65-70
- [4] Dehnel M, Dommel H W. A Method for Identifying Weak Nodes in Non-convergent Load Flows [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(2): 801-807.
- [5] 段建民,张焰,王承民,等. 提高大规模电力系统静态电压稳定性的无功补偿方法 [J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(12): 2088-2092
DUAN Jian-min, ZHANG Yan, WANG Cheng-min, et al. A Reactive Power Compensation Method for Enhancing Extensive Power System Steady State Voltage Stability [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(12): 2088-2092
- [6] Kundur P. Power System stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill, 1994. 17-41.
- [7] Palmer E W, Ledwich G. Optimal Placement of Angle Transducers in Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 788-793.
- [8] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2002
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Theory and Analysis for Dynamic Power Systems [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002
- [9] Tse C T, Tso S K. Approach of the Study of Small-perturbation Stability of Multimachine Systems [J]. IEE Proc—Gener, Transm, and Distrib, 1988, 135(5): 396-405.
- [10] Chung C Y, Wang K W, Tse C T. Selection of the Location and Damping Signal for Static Var Compensator by Versatile Modeling [J]. Electric Power Systems Research, 2000, 153: 7-14
- [11] Wang K W, Chung C Y, Tse C T, et al. Multimachine Eigenvalue Sensitivities of Power System Parameter [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 741-747.
- [12] 程浩忠,吴浩. 电力系统无功与电压稳定性 [M]. 北京:中国电力出版社, 2004
CHEN Hao-zhong, WU Hao. Voltage Stability and Reactive power in Power Systems [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004
- [13] Chung C Y, Wang K W, Cheng C K, et al. Machine and Load Modeling in Large Scale Power Industries [A]. Proc of Dynamic Modeling Control Applications for Industry Workshop, IEEE Industry Applications Society 1998. 7-15.

收稿日期: 2006-02-27; 修回日期: 2006-06-06

作者简介:

宗秀红 (1978 -),女,博士研究生,主要从事电力系统稳定性分析与控制方向的研究; Email: tfdong@sohu.com

张尧 (1948 -),男,博士,教授,博士生导师,从事电力系统分析及电压稳定的研究工作;

董泰福 (1976 -),男,硕士研究生,主要进行电力系统故障诊断、故障恢复等研究。

Eigenvalue sensitivity index for voltage weak-node based on GMR technique

ZONG Xiu-hong, ZHANG Yao, DONG Tai-fu

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The system state matrix for small disturbance eigenvalue analysis can be formed quickly and simply using the general multi-machine expression (GMR) technique, and then the system eigenvalues and the eigenvalue sensitivities can be easily computed. Based on the GMR technique, two eigenvalue sensitivity indexes, i.e. the reactive power sensitivity index and the admittance sensitivity index of eigenvalues, to determine the system voltage weak nodes are given in this paper, respectively. According to these sensitivity indexes, the nodal voltages can be effectively controlled by choosing the voltage weak nodes. The proposed sensitivity indexes are tested on a 5-node system. Results indicate that the reactive compensation at the voltage weak nodes chosen by the proposed eigenvalue sensitivity indexes is optimal.

Key words: voltage stability; reactive power compensation; eigenvalue; sensitivity