

故障系统低频振荡特征值分析方法

马 静, 彭明法, 王 彤, 杨奇逊

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 针对平衡点特征值法不能正确反映故障系统的振荡特性, 以及轨迹特征值法窗口宽度难以选择的问题, 提出一种适用于分析故障系统特征值的方法。利用共享因子将故障切除后的系统进行等值, 再利用原网络及故障分量网络支路电流求取故障后各支路电流及功率, 在此基础上, 建立系统的等值模型, 在各测点处将模型分段线性化, 并结合实际受扰轨迹求解故障系统特征值的时间序列。2 机和 16 机系统仿真结果表明, 所提方法能实时准确地描述故障系统的时变振荡特性。

关键词: 电力系统; 故障等值; 低频振荡; 时变特征值; 模型轨迹法; 稳定性; 模型

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.003

0 引言

在故障切除后, 由于电力系统的时变和非线性因素显著增强, 传统的低频振荡分析方法很难准确反映事故后特征值的变化情况^[1-2]。因此, 如何从故障系统中提取时变非线性的振荡特性是亟待解决的难题^[3-4]。

平衡点特征值法可以描述定长线性系统的全局动态行为, 并且可以定量解释低频振荡的机理^[5-6], 但是随着系统规模的日益扩大以及结构日趋复杂, 利用平衡点特征值法反映系统的振荡特性愈加困难。特别是系统在强时变、强非线性运行条件下, 利用平衡点特征值法很可能得到完全错误的结论。为此, 众多专家和学者提出了与受扰轨迹密切相关的轨迹特征值法。有别于平衡点特征值法, 轨迹特征值法沿着实际受扰轨迹, 在不同时间窗口中获取振荡频率和阻尼系数的时间序列^[7]。轨迹特征值的时间序列可以反映时变非线性系统在指定扰动下被激发的振荡模式及其随时间的变化情况^[8]。但轨迹特征值法的研究主要集中于确定性扰动场景, 对于系统在故障类随机因素下(如故障持续时间和故障位置),

特征值变化情况的研究则相对较少。且该方法对于窗口宽度的选取依赖性较强, 当窗口过宽时, 将会掩盖系统的时变振荡特性, 而过窄则将会大幅度增加计算量。

本文将平衡点特征值法与轨迹特征值法相结合, 提出了一种适用于分析故障系统低频振荡特征值的模型轨迹法。首先, 利用共享因子将故障后的系统进行等值, 再利用原网络支路电流和故障分量网络支路电流, 求取故障后各支路电流以及功率, 在此基础上, 建立系统的模型并在各测点处分段线性化, 将分段线性化模型与系统的受扰轨迹相结合, 求解系统特征值的时间序列。最后, 利用 2 机系统和 16 机系统, 分析故障切除后系统特征值和阻尼比的变化情况, 算例验证了该方法的正确性和有效性。

1 故障系统的稳定性分析

1.1 故障模型的等值

电力系统的节点电压方程可描述为^[9]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{NN} & \mathbf{Y}_{NM} \\ \mathbf{Y}_{MN} & \mathbf{Y}_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_N \\ \mathbf{U}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_N \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, 下标 N 表示发电机节点; 下标 M 表示联络节点(包含负荷节点); \mathbf{U}_N 为发电机节点电压; \mathbf{U}_M 为联络节点(包含负荷节点)电压; \mathbf{I}_N 为发电机节点注入电流。

消去联络节点^[10], 可得仅包含发电机节点的节点电压方程:

$$\mathbf{Y}'_{NN} \mathbf{U}_N = \mathbf{I}_N \quad (2)$$

其中, $\mathbf{Y}'_{NN} = \mathbf{Y}_{NN} - \mathbf{Y}_{NM} \mathbf{Y}_{MM}^{-1} \mathbf{Y}_{MN}$ 为系统的缩减导纳阵。

由式(2)可得各发电机注入节点的电流。网络支路电流 \mathbf{I}_b 与节点注入电流 \mathbf{I}_N 的关系如下:

$$\mathbf{I}_b = \mathbf{Y} \mathbf{A}^T \mathbf{Y}_n^{-1} \mathbf{I}_N = \mathbf{C} \mathbf{I}_N \quad (3)$$

其中, \mathbf{Y} 为支路导纳阵; \mathbf{A} 为节点关联阵; \mathbf{Y}_n 为全网络节点导纳阵; $\mathbf{C} = \mathbf{Y} \mathbf{A}^T \mathbf{Y}_n^{-1}$ 为共享因子矩阵。

图 1 为等值 2 机系统电路图。在 t_0 时刻, 系统联络线 1 上某点发生三相短路, 其中短路点距节点 B_1 的

收稿日期: 2013-04-14; 修回日期: 2014-01-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012-CB215200); 国家自然科学基金资助项目(51277193, 509070-21, 50837002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(11-MG01); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目([2011]1139); 河北自然科学基金资助项目(E2012502034); 中国电机工程学会电力青年科技创新项目([2012]46); 河北省电力公司科技项目(KJ[2012]278-280)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2012CB215200), the National Natural Science Foundation of China(51277193, 50907021, 50837002), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(11MG01), the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry([2011]1139), Hebei Natural Science Foundation(E2012502034), the Electric Power Youth Science and Technology Creativity Foundation of CSEE([2012]46) and the Science Foundation of Hebei Electric Power Corporation(KJ[2012]278-280)

距离占整条线路全长的比例为 α 。经过短路持续时间 t_c 后将故障线路切除, 切除后的网络如图 2 所示。

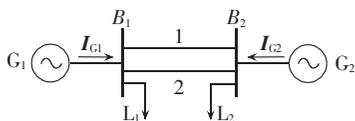


图 1 2 机系统线路图

Fig.1 Two-generator system

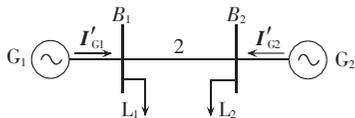


图 2 系统故障支路切除后的线路图

Fig.2 Two-generator system after faulty line is tripped

设故障前发电机的节点注入电流为 I_{N1} , 线路切除后发电机的注入电流发生变化, 记为 I_{N2} 。根据叠加原理, 线路切除后网络中的潮流分布可以看成由线路切除前的支路潮流和线路切除所引起的故障分量两部分组成, 即图 2 可由图 1 和图 3 叠加等值而成^[11]。需要注意的是, 此时

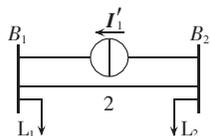


图 3 仅含故障分量的等值网络

Fig.3 Equivalent system only containing fault components

时线路切除前的(原)网络注入电流为 I_{N2} 。

当节点注入电流为 I_{N2} 时, 由式(3)可知, 支路 i 上的电流为:

$$I'_i = C_i I_{N2} \quad (4)$$

其中, I'_i 为支路 i 上的电流; C_i 为矩阵 C 的第 i 行。

当系统支路 i 发生故障切除后, 系统的故障分量网络仅有一个激励源, 即 I'_i , 因此其他线路上的潮流仅与该激励源有关。此时, 网络的节点电压方程可写为:

$$Y'_n U_n = [0 \ \dots \ 0 \ I'_i]^T \quad (5)$$

其中, Y'_n 为故障等值网络的节点导纳阵。

由式(5)可知, 该激励源注入各支路的电流为:

$$I'' = Y'(A')^T (Y'_n)^{-1} [0 \ \dots \ 0 \ I'_i]^T = D I'_i \quad (6)$$

其中, I'' 为故障分量网络中各支路的电流; Y' 为该网络的支路导纳阵; A' 为节点关联阵; D 为共享因子矩阵 $C = Y A^T Y_n^{-1}$ 的最后一列。

根据共享因子矩阵, 当故障支路切除后, 支路 k 的电流可用下式表示:

$$I_k = I'_k + D_k I'_i - C_k I_{N2} + D_k C_i I_{N2} = (C_k + D_k C_i) I_{N2} \quad (7)$$

其中, D_k 为矩阵 C 第 k 行的最后一列。

将式(2)代入式(7), 可得由发电机节点电压表示的支路电流:

$$I_k = (C_k + D_k C_i) I_{N2} = (C_k + D_k C_i) Y'_{NN} U_N = [E_1 \ E_2 \ \dots \ E_n] \times [U_{G1} \angle \delta_1 \ U_{G2} \angle \delta_2 \ \dots \ U_{Gn} \angle \delta_n]^T = U_{G1} |E_1| \angle (\delta_1 + \phi_1) + \dots + U_{Gn} |E_n| \angle (\delta_n + \phi_n) \quad (8)$$

其中, $E = C_k + D_k C_i$, $|E_i|$ 、 ϕ_i ($i=1, 2, \dots, n$) 分别为 E 中第 i 个元素的幅值和相角; U_{Gj} 、 δ_j ($j=1, 2, \dots, n$) 分别为第 j 个发电机节点电压的幅值和相角; n 为发电机节点数。

对于图 1 所示的 2 机系统, 当支路 1 发生故障切除后, 支路 2 上的电流发生变化, 由前面推导可得支路 2 的电流为:

$$I_2 = U_{G1} |E_1| \angle (\delta_1 + \phi_1) + U_{G2} |E_2| \angle (\delta_2 + \phi_2) \quad (9)$$

此时, 两发电机之间传送的功率可由式(10)表示:

$$P_{12} = \text{Re}(U_{G1} I_2^*) = \text{Re}[U_{G1} |E_1| \angle -\phi_1 + U_{G1} U_{G2} |E_2| \angle (\delta_1 - \delta_2 - \phi_2)] = U_{G1}^2 |E_1| \cos \phi_1 + U_{G1} U_{G2} |E_2| \cos (\delta_1 - \delta_2 - \phi_2) \quad (10)$$

$$P_{21} = U_{G2}^2 |E_2| \cos \phi_2 + U_{G1} U_{G2} |E_1| \cos (\delta_2 - \delta_1 - \phi_1)$$

将故障切除后的网络进行等值, 通过原网络的节点电压和故障分量网络的支路电流, 求取故障切除后网络各支路的电流和功率, 以此对系统的特征值进行分析。

1.2 故障系统时变振荡特性分析

以 2 机系统为例, 分析系统在故障切除后的特征值问题, 系统的结构如图 1 所示。引入 2 机系统经典转子运动方程, 并忽略机械功率的变化, 则系统经过小扰动线性化后的方程可用下式表示^[12]:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta}_i = \omega_0 \Delta \omega_i & i=1, 2 \\ M_1 \Delta \dot{\omega}_1 = -\Delta P_{e1} - K_{D1} \Delta \omega_1 \\ M_2 \Delta \dot{\omega}_2 = -\Delta P_{e2} - K_{D2} \Delta \omega_2 \end{cases} \quad (11)$$

其中, δ_i ($i=1, 2$) 为第 i 台发电机转子旋转的电角度; ω_0 为同步速; ω_i ($i=1, 2$) 为第 i 台发电机转子的电角速度; M_i ($i=1, 2$) 为第 i 台发电机的惯性时间常数; P_{ei} ($i=1, 2$) 为第 i 台发电机的电磁功率; K_{Di} ($i=1, 2$) 为第 i 台发电机的阻尼系数。

根据功率平衡, 发电机输出的电磁功率可表示为^[13-14]:

$$\begin{cases} P_{e1} = P_{L1} + P_{12} = P_{L1} + U_{G1}^2 |E_1| \cos \phi_1 + U_{G1} U_{G2} |E_2| \cos (\delta_1 - \delta_2 - \phi_2) \\ P_{e2} = P_{L2} + P_{21} = P_{L2} + U_{G2}^2 |E_2| \cos \phi_2 + U_{G1} U_{G2} |E_1| \cos (\delta_2 - \delta_1 - \phi_1) \end{cases} \quad (12)$$

其中, P_{L1} 、 P_{L2} 分别为负荷 L_1 、 L_2 的有功功率; P_{12} 、 P_{21} 为发电机 G_1 与 G_2 之间的传输功率。

发电机输出的功率经过小扰动线性化后的表达式如下:

$$\begin{cases} \Delta P_{e1} = U_{G1} U_{G2} |E_2| [-\sin (\delta_1 - \delta_2 - \phi_2) \Delta \delta_1 + \sin (\delta_1 - \delta_2 - \phi_2) \Delta \delta_2] = k_{11} \Delta \delta_1 + k_{12} \Delta \delta_2 \\ \Delta P_{e2} = U_{G1} U_{G2} |E_1| [\sin (\delta_2 - \delta_1 - \phi_1) \Delta \delta_1 - \sin (\delta_2 - \delta_1 - \phi_1) \Delta \delta_2] = k_{21} \Delta \delta_1 + k_{22} \Delta \delta_2 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} k_{11} = -k_{12} = -U_{G1} U_{G2} |E_2| \sin (\delta_1 - \delta_2 - \phi_2) \\ k_{21} = -k_{22} = U_{G1} U_{G2} |E_1| \sin (\delta_2 - \delta_1 - \phi_1) \end{cases} \quad (14)$$

将式(13)代入式(11),可得故障线路切除后系统的状态方程:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta}_i = \omega_0 \Delta \omega_i & i=1,2 \\ M_1 \Delta \dot{\omega}_1 = -(k_{11} \Delta \delta_1 + k_{12} \Delta \delta_2) - K_{D1} \Delta \omega_1 \\ M_2 \Delta \dot{\omega}_2 = -(k_{21} \Delta \delta_1 + k_{22} \Delta \delta_2) - K_{D2} \Delta \omega_2 \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可得,此时系统的状态矩阵 \mathbf{A} 为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \mathbf{I} & & \\ \frac{-k_{11r}}{M_1} & \frac{-k_{12r}}{M_1} & \frac{-K_{D1r}}{M_1} & 0 \\ \frac{-k_{21r}}{M_2} & \frac{-k_{22r}}{M_2} & 0 & \frac{-K_{D2r}}{M_2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中, \mathbf{I} 为 2×2 维单位阵; $k_{11r}, k_{12r}, k_{21r}, k_{22r}, K_{D1r}, K_{D2r}$ 分别为 $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}, K_{D1}, K_{D2}$ 的时变值。

将系统相应时刻电压的实测值代入式(16),可得该时刻系统的振荡特征值,据此,可得特征值的完整时间序列。

需要注意的是,当系统发生扰动的时候,发电机节点的电压幅值和相角不再是常量,由式(16)可知,系统的状态矩阵 \mathbf{A} 中部分元素也会发生改变,同时,系统的特征值亦发生变化。再者,随着电压幅值和相角变化幅度的增加,特征值的变化幅度也将相应增加。

2 算例分析

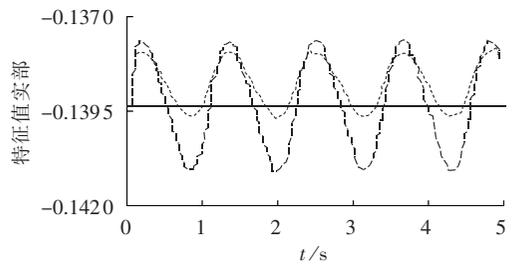
2.1 等值2机系统算例仿真

2机系统采用经典二阶模型,系统在0.1s时联络线1上某点处发生三相短路。故障点距节点1的距离占线路全长的比例为 α ,经过故障持续时间 t_c 后,将故障线路切除。考虑以下几种故障情况,分析故障系统的时变振荡特性。

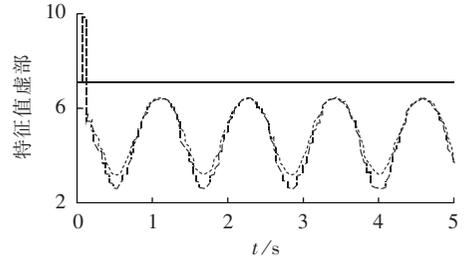
- 比例 α 取 0.5,故障持续时间 t_c 为 0.05 s。
- 比例 α 取 0.9,故障持续时间 t_c 为 0.05 s。
- 比例 α 取 0.5,故障持续时间 t_c 为 0.1 s。
- 比例 α 取 0.9,故障持续时间 t_c 为 0.1 s。

通过仿真得到系统受扰轨迹后,将相应的实测值代入式(16),计算系统实时特征值的变化情况^[15],如图4—7所示。

由图4和图5可知,当短路持续时间为0.05s,故障位置改变时两者故障切除后的特征值变化影响较小。其中,精确特征值的实部变化区间为-0.1395~-0.1380,虚部变化区间为3.1~6.7,而利用本文方法计算得到的实部区间为-0.1412~-0.1378,虚部区间为2.5~6.7。由图6和图7可知,当短路持续时间为0.1s时,此时故障位置改变对故障切除后特征值的影响较大,特征值在实数与复数之间交替变化:当 α 为0.5时,精确特征值实部区间为-0.14~2.1,虚部区间为0~7,而用本文方法计算得到的实部区间为



(a) 特征值实部

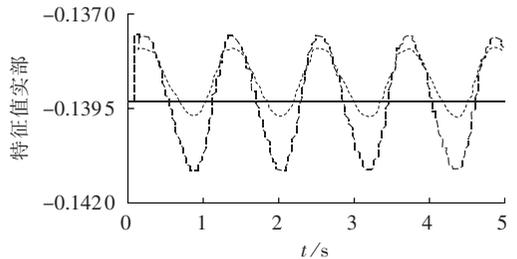


(b) 特征值虚部

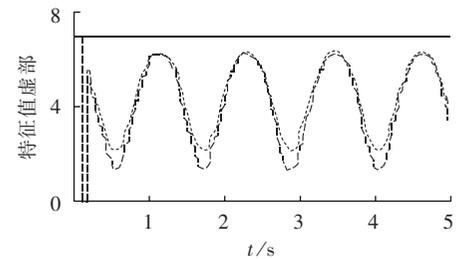
—平衡点算法,---精确特征值,--本文方法

图4 $\alpha=0.5, t_c=0.05$ s 时仿真结果

Fig.4 Simulative results when α is 0.5 and t_c is 0.05 s



(a) 特征值实部



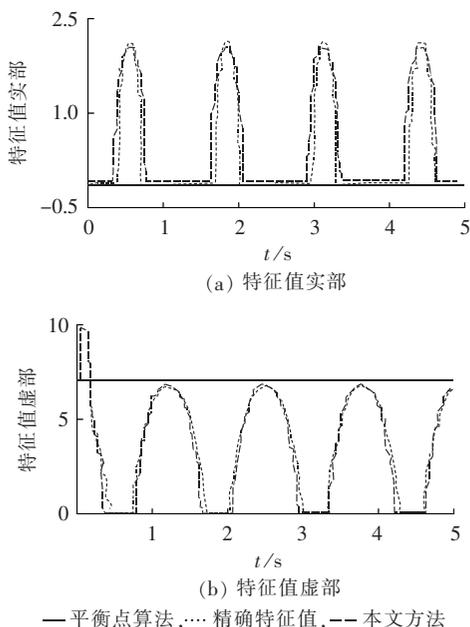
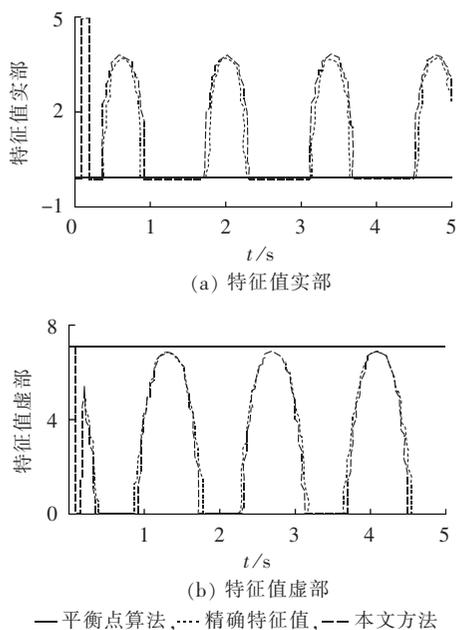
(b) 特征值虚部

—平衡点算法,---精确特征值,--本文方法

图5 $\alpha=0.9, t_c=0.05$ s 时仿真结果

Fig.5 Simulative results when α is 0.9 and t_c is 0.05 s

-0.14~2.2,虚部区间为0~7;当 α 为0.9时,精确特征值实部区间为-0.14~3.8,虚部区间为0~7,而用本文方法计算得到的实部区间为-0.14~3.8,虚部区间为0~7,虽然两者的变化区间相近,然而,在同一时刻两者的特征值差异较大。由此可知,不同故障类随机因素对故障切除后的特征值将产生不同影响。一方面,系统在故障切除后,由本文方法计算得到故障切除后的特征值不再是常量,并且变化幅度较为明显。另一方面,系统故障切除后的特征值随着短路持续时间和故障位置的不同,其变化差异较大。

图 6 $\alpha=0.5, t_c=0.1$ s 时仿真结果Fig.6 Simulative results when α is 0.5 and t_c is 0.1 s图 7 $\alpha=0.9, t_c=0.1$ s 时仿真结果Fig.7 Simulative results when α is 0.9 and t_c is 0.1 s

由图 4—7 还可以看出,利用本文方法计算得到的特征值能较精确地反映系统实际特征值的变化情况,而利用平衡点算法计算得到的特征值为常数,不能实时反映系统特征值。由平衡点算法计算得到的偏差可由下式表示:

$$R_{\text{err}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (R_i - R_0)^2} \quad (17)$$

$$M_{\text{err}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (M_i - M_0)^2} \quad (18)$$

$$\xi_{\text{err}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\xi_i - \xi_0)^2} \quad (19)$$

其中, R_i, M_i, ξ_i 分别为利用第 i 时刻的实测值计算得到的特征值实部、虚部和阻尼比; R_0, M_0, ξ_0 分别为利用平衡点算法得到的特征值的实部、虚部和阻尼比; $R_{\text{err}}, M_{\text{err}}, \xi_{\text{err}}$ 分别表示平衡点法与本文方法的偏差; m 为实测点个数。

表 1 给出了 4 种情况下,利用平衡点法与本文方法计算得到的特征值和阻尼比的相对偏差。由表 1 可见,短路持续时间越长,利用 2 种方法计算出的特征值和阻尼比偏差越大,故障位置 α 越大,两者的偏差也越大。该表同样表明未考虑故障类随机因素的平衡点法不能正确反映故障系统的实时特征值变化情况。

表 1 平衡点算法的均方误差

Tab.1 Mean square error of equilibrium-point method

情况	特征值相对偏差		阻尼比相对偏差 / %
	实部	虚部	
a	0.0012	2.7502	1.6956
b	1.3094	3.0575	12.9311
c	2.2108	6.7625	58.4422
d	2.9867	5.3747	69.9358

2.2 16 机系统仿真算例分析

采用 IEEE 16 机 68 节点^[16-18]的新英格兰—纽约互联系统进一步验证本文方法的正确性和有效性,系统结构如图 8 所示,该系统可分为五大区域。其中发电机采用六阶详细模型,励磁采用 IEEE-DC1 型励磁。系统在 0.1 s 时刻,线路 28—29 某处发生三相短路故障,故障点距节点 28 的距离占线路全长的比例为 α 。分析以下 4 种故障情况下,故障切除后系统的特征值变化情况。

- 比例 α 取 0.5,故障持续时间 t_c 为 0.02 s。
- 比例 α 取 0.9,故障持续时间 t_c 为 0.02 s。
- 比例 α 取 0.5,故障持续时间 t_c 为 0.05 s。

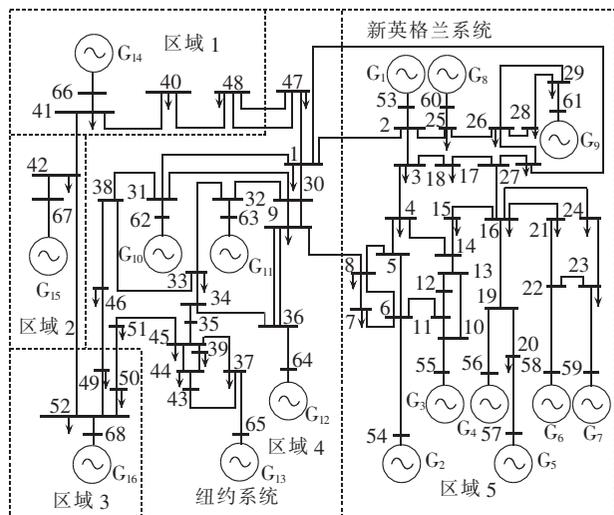
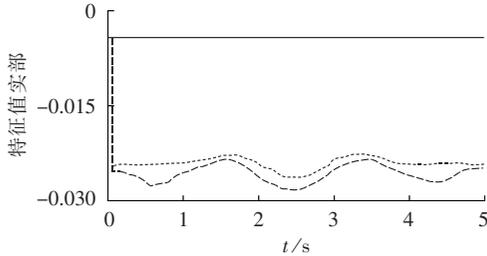


图 8 16 机 68 节点电网结构图

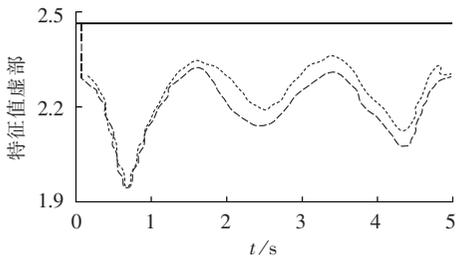
Fig.8 Structure of 16-generator 68-bus system

d. 比例 α 取 0.9,故障持续时间 t_c 为 0.05 s。

将系统仿真得到的轨迹代入式(16)中,由此得到特征值的时间序列。其中区域 4 与区域 5 之间振荡模式的时间序列如图 9—12 所示。



(a) 特征值实部

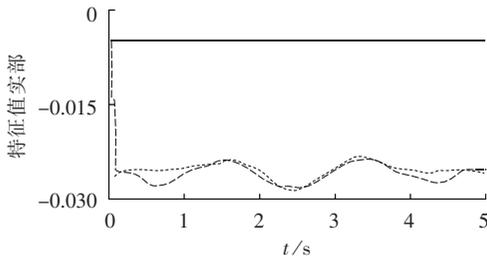


(b) 特征值虚部

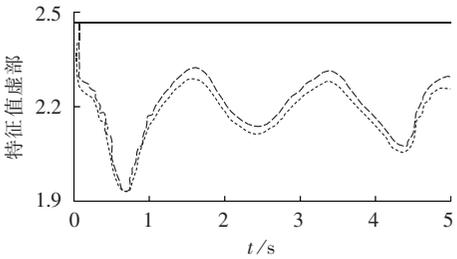
—平衡点算法,···精确特征值,--本文方法

图 9 $\alpha=0.5, t_c=0.02$ s 时仿真结果

Fig.9 Simulative results when α is 0.5 and t_c is 0.02 s



(a) 特征值实部



(b) 特征值虚部

—平衡点算法,···精确特征值,--本文方法

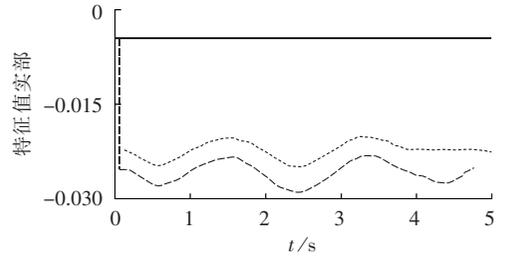
图 10 $\alpha=0.9, t_c=0.02$ s 时仿真结果

Fig.10 Simulative results when α is 0.9 and t_c is 0.02 s

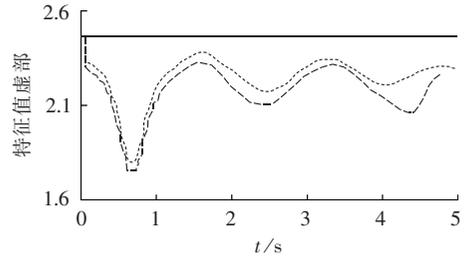
由图 9—12 可知,基于本文方法计算得到的特征值亦不再为常量,而是随时间发生相应的变化,且随故障持续时间和故障位置的不同,其变化情况也各异。同时,本文方法能够较精确地跟踪系统的特征值变化。

表 2 给出了不同短路持续时间和故障位置时,利用平衡点法与本文方法计算得到的特征值和阻尼

比的相对偏差。由表 2 可知,当短路持续时间越长时,利用平衡点法与利用本文方法得到的特征值和阻尼比的偏差越大,这同样也表明平衡点法不能正确反映故障系统的振荡特性。



(a) 特征值实部

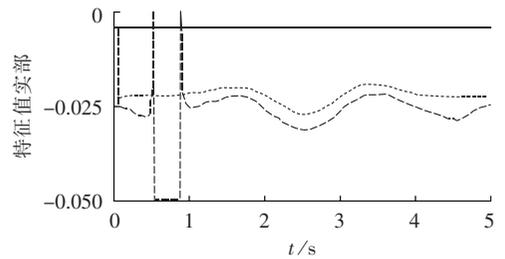


(b) 特征值虚部

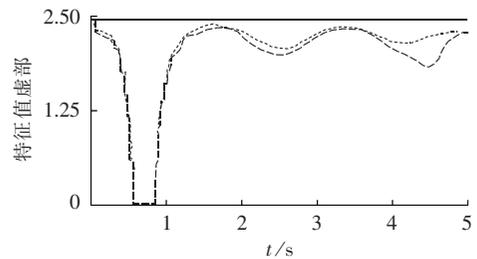
—平衡点算法,···精确特征值,--本文方法

图 11 $\alpha=0.5, t_c=0.05$ s 时仿真结果

Fig.11 Simulative results when α is 0.5 and t_c is 0.05 s



(a) 特征值实部



(b) 特征值虚部

—平衡点算法,···精确特征值,--本文方法

图 12 $\alpha=0.9, t_c=0.05$ s 时仿真结果

Fig.12 Simulative results when α is 0.9 and t_c is 0.05 s

表 2 平衡点算法的均方误差

Tab.2 Mean square error of equilibrium-point method

情况	特征值相对偏差		阻尼比相对偏差/%
	实部	虚部	
a	0.0195	0.2823	0.988 1
b	0.0213	0.2871	0.997 1
c	0.0237	0.3245	1.015 1
d	0.3065	0.8894	30.159 6

3 结论

本文提出了一种分析故障切除后系统低频特征值的方法,即模型轨迹法,该方法首先将故障切除后的系统进行等值,再利用原网络支路电流和故障分量网络支路电流,求取故障后各支路电流以及功率,在此基础上,建立等值系统的运动方程,并在各测点处将等值模型分段线性化,结合实际受扰轨迹,求解系统特征值的时间序列。最后,利用2机系统和16机系统,分析故障类随机因素对系统振荡特性的影响,算例结果验证了该方法较平衡点特征值法,能够更准确地跟踪系统特征值的变化情况,同时,也有效避免了利用轨迹特征根法求解电力系统时变特征值的窗口选取问题。

参考文献:

- [1] 薛禹胜,郝思鹏,刘俊勇,等. 关于低频振荡分析方法的评述[J]. 电力系统自动化,2009,33(3):1-8.
XUE Yusheng,HAO Sipeng,LIU Junyong,et al. A review of analysis methods for low-frequency oscillations[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(3):1-8.
- [2] 马静,彭明法,王彤,等. 基于二阶摄动理论的不确定系统小干扰稳定分析方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):117-120.
MA Jing,PENG Mingfa,WANG Tong,et al. Small signal stability analysis based on second order perturbation theory for uncertain power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(7):117-120.
- [3] 朱方,赵红光,刘增煌,等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报,2007,27(1):1-7.
ZHU Fang,ZHAO Hongguang,LIU Zenghuang,et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(1):1-7.
- [4] 余贻鑫,李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报,2005,25(11):6-11.
YU Yixin,LI Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(11):6-11.
- [5] XUE Y,SHI M,CHAI Y. Fast initial estimation of power system eigenvalues[C]//Proceedings of the IFAC Symposium on Power Systems and Power Plant Control. Seoul,Korea:[s.n.],1989:197-206.
- [6] 於益军,薛禹胜. 大型电力系统机电模式特征根的直接初估和快速求解[J]. 电网技术,1996,20(2):21-23.
YU Yijun,XUE Yusheng. Direct estimation and fast calculation of swing mode eigenvalues of large power systems[J]. Power System Technology,1996,20(2):21-23.
- [7] 郝思鹏,薛禹胜,唐茂林,等. 通过轨迹特征根分析时变振荡特性[J]. 电力系统自动化,2009,33(6):1-5.
HAO Sipeng,XUE Yusheng,TANG Maolin,et al. Trajectory eigenvalues analysis time variant oscillation characters[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(6):1-5.
- [8] 潘学萍,薛禹胜,张晓明,等. 轨迹特征根的解析估算及误差分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(19):10-14.
PAN Xueping,XUE Yusheng,ZHANG Xiaoming,et al. Analytical

calculation of power system trajectory eigenvalues and its error analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(19): 10-14.

- [9] 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,2005:235-251.
- [10] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社,2007:24-55.
- [11] 徐慧明. 可识别潮流转移的广域后备保护机器及其控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2007.
XU Huiming. Wide area backup protection and control strategy to prevent cascading trips[D]. Beijing:North China Electric Power University,2007.
- [12] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA:McGraw-Hill,1994:33-89.
- [13] 洪峰,陈金富,段献忠,等. 弱互联大区电网联络线功率振荡研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(10):46-51.
HONG Feng,CHEN Jinfu,DUAN Xianzhong,et al. Research on tie line power flow oscillation in weak interconnection power grids[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(10):46-51.
- [14] 余一平,闵勇,陈磊,等. 周期性负荷扰动引发强迫功率振荡分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(6):7-11.
YU Yiping,MIN Yong,CHEN Lei,et al. Analysis of forced power oscillation caused by continuous cyclical load disturbances [J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(6):7-11.
- [15] 马静,李金龙,叶东华,等. 基于故障关联因子的新型广域后备保护[J]. 中国电机工程学报,2010,34(20):55-59.
MA Jing,LI Jinlong,YE Donghua,et al. A novel wide area back up protection principle based on fault matching degree[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(20):55-59.
- [16] 马静,王彤,杨奇逊. 基于摄动矩阵和凸多胞体的不确定性鲁棒 H_2/H_∞ 控制方法研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):22-27.
MA Jing,WANG Tong,YANG Qixun. Robust H_2/H_∞ control considering uncertainties based on perturbation matrix and polytopic model[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):22-27.
- [17] 马静,王彤,王增平,等. 基于非凸稳定区域的广域阻尼鲁棒控制策略[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):14-18.
MA Jing,WANG Tong,WANG Zengping,et al. Wide-area damping robust control based on non-convex stable region[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):14-18.
- [18] ROGERS G. Power system oscillations[M]. Boston,USA:Kluwer Academic Publishers,2000:101-115.

作者简介:



马静

马静(1981-),男,山西阳泉人,副教授,博士后,研究方向为电力系统稳定与控制;

彭明法(1989-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事电力系统稳定与控制等方面的研究(E-mail:pmf1989@sina.com);

王彤(1985-),女,河北石家庄人,博士,主要从事电力系统稳定与控制等方面的研究;

杨奇逊(1937-),男,上海人,中国工程院院士,博士研究生导师,研究方向为电力系统保护与控制。

基于参数化潮流模型的可用输电能力改进算法

罗 钢,石东源,陈金富

(华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要: 提出一种基于参数化潮流模型的大型互联电网可用输电能力改进算法。该方法建立在重复潮流法的框架下,利用连续潮流模型改进原有计算过程,通过主从迭代解决潮流分析中的收敛性与稳定性问题,并计及功率增长方向对结果的影响;约束校验过程中将故障参数化,通过建立连续潮流模型来辨别潮流无解时系统是否真实失稳;多断面功率控制过程中将断面功率参数化,建立连续潮流模型改进功率调整过程。通过 CEPRI 36 节点系统与实际大型互联电网的算例验证了所提算法的有效性以及对潮流收敛性较差系统的适应性。

关键词: 可用输电能力; 连续潮流法; 重复潮流法; 故障校验; 功率控制; 大型互联电网; 模型

中图分类号: TM 744

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.004

0 引言

在中国建设特高压同步互联电网^[1-6]的背景下,对于超大区域互联系统的运行与调度部门,可用输电能力(ATC)^[7-8]正逐渐成为年度/季度运行方式安排、日前调度计划制定、实时调度运行与控制所关注的重要指标。系统规模的扩大使得 ATC 计算的复杂性越来越高,对所采用算法的速度与精度也提出了更高的要求。

目前,在电力调度部门通常采用确定性的 ATC 计算方法,其基本过程可描述为:在功率注入空间中,从某一基本运行点出发,通过调整运行方式,在

多种静态约束与动态约束共同确定的安全域内搜索极限运行点,将该点所确定的断面传输功率作为极限传输功率。不同的极限运行点搜索方法形成了如下不同的 ATC 算法:

a. 最优潮流(OPF)法^[9-11]直接在安全域的边界上寻找理想的最优运行点,不考虑如何从基态到达该点,给出的是理想的目标方案,可能无法实现,且优化算法耗时较多;

b. 连续潮流(CPF)法^[12-14]在搜索过程中,沿预先确定的方向搜索到安全域边界上的某一点,即作为极限运行点,能够克服牛顿潮流法在电压稳定极限点的潮流不收敛问题,但预先确定的功率增长方向在计算过程中无法改变,所求结果忽略了发电和负荷的优化分布;

c. 重复潮流(RPF)法^[15-17]与 CPF 法类似,但其搜索过程无需明确指出搜索方向,具有一定的开放性,搜索结果可能是安全域边界上的任意一点,存在偶然性。

收稿日期:2013-05-09;修回日期:2014-01-18

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009-CB219701);国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011-AA05A101);国家自然科学基金资助项目(50937002)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2009CB219701),the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05A101) and the National Natural Science Foundation of China(50937002)

Analysis methods for low-frequency oscillation eigenvalue of faulty system

MA Jing,PENG Mingfa,WANG Tong,YANG Qixun

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: Since the equilibrium-point eigenvalue method cannot correctly reflect the oscillation characteristics of faulty system and the trajectory eigenvalue method is difficult to set its window length,an eigenvalue analysis method suitable for faulty system is proposed,which equates the system after fault removing by mutual factor,calculates the post-fault current and power for each branch according to the branch currents of primal power grid and fault component grid,buils the equivalent system model,linearizes piecewise the model at each measuring point,and solves the chronological eigenvalue sequence of faulty system based on the measured disturbed trajectory. The simulative results of 2-generator system and 16-generator system show that the time-varying oscillation characteristics of faulty system are precisely described in real time.

Key words: electric power systems; fault equivalence; low-frequency oscillation; time-varying eigenvalue; model-trajectory method; stability; models