

电力系统小干扰稳定分析的最小特征轨迹法

黄伟¹, 张清波², 许昊², 吴司敏², 甘德强²

(1. 云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650011; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:提出了一种基于Nyquist特征轨迹的多输入-多输出系统小干扰稳定分析方法,可以量化原动机-调速器回路及附加励磁控制回路对稳定裕度的贡献。首先通过框图变换得到了一种便于分析的简洁形式的Heffron-Phillips模型,然后根据广义Nyquist曲线和特征轨迹的关系定义了新的稳定裕度。基于前述模型推导了稳定裕度的线性解析表达式,该线性表达式包含了原动机-调速器回路以及附加励磁控制回路,从而能够清晰地看出二者对稳定裕度的影响。除此以外,所提方法还可以作为控制器参数的设置。最后通过多个算例证明了所提方法的准确性和有效性。

关键词:电力系统;小干扰稳定性;广义Nyquist曲线;特征轨迹;相角补偿

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202205025

0 引言

我国电网当前呈现交直流混联及新能源高渗透率的发展趋势,为电力系统小干扰稳定分析带来新的挑战^[1]。面对日益复杂的电网,电力系统小干扰稳定分析需从以下3个层面进行考虑:第一,系统中的控制器(如电力系统稳定器PSS(Power System Stabilizer)和调速器)参数的变化对系统稳定性的影响;第二,系统工况变化(如机组出力连续变化)对系统稳定性的影响;第三,系统模型的变化(如重要元件的投退)对系统稳定性的影响。目前,以PSS设计为核心的第一层面的问题已被较好地解决^[2],而第二、三层面的问题仍需深入研究。

依据稳定性分析方法及判据的不同,电力系统小干扰稳定分析大致包括5类^[3]:基于状态空间系数矩阵特征值分析的方法,常见的方法包括阻尼转矩法^[4-5]、留数法^[6]、灵敏度分析等;基于传递函数矩阵分析的方法,包括广义Nyquist判据^[7]、 μ 分析^[8]、多回路稳定裕度 k_m 法^[9]、 H_∞ 控制^[10]等;基于Lyapunov判据的分析方法^[11-12];基于Mikhailov定理的多项式分析方法^[3];基于代数判据,如Routh-Hurwitz判据等。方法虽多但优劣各异,有些方法未推导稳定裕度解析表达式,还有些方法无法分析任意回路对稳定性的影响。

本文提出一种基于广义Nyquist判据的电力系统小干扰稳定分析方法:最小特征轨迹法。该方法根据简洁形式的转子回路模型得到回差矩阵的最小特征轨迹偏离原点的距离,即系统稳定裕度。推导

了最小特征轨迹的近似解析表达式,从而量化了各个控制回路对系统稳定裕度的贡献。所提方法具有比较严密的理论基础,通用性较强,适用于电力系统超低频和低频振荡分析,并且有望被应用于更加复杂的电力系统稳定分析问题。通过仿真算例进一步验证了所提方法理论分析的正确性和工程实用性。

1 小干扰稳定分析的反馈系统模型

小干扰稳定分析Heffron-Phillips模型^[13]如附录A图A1(a)所示。图中: $G_M(s)$ 为原动机-调速器传递函数矩阵, $H_{PSS}(s)$ 为PSS传递函数矩阵, M 为发电机惯性时间常数矩阵, K_D 为阻尼系数矩阵, T'_{d0} 为直轴暂态开路时间常数矩阵, $G_{EX}(s)$ 为自动电压调节器的传递函数矩阵, I 为单位阵,以上矩阵均为对角矩阵; K_1-K_6 为与元件参数及运行工况相关的系数矩阵; ΔP_{e1} 和 ΔP_{e2} 分别为通过 K_1 和 K_2 的电磁转矩增量; ΔP_m 为机械转矩增量; $\Delta \omega$ 为转速增量; $\Delta \delta$ 为转子角增量; $\Delta E'_q$ 为发电机暂态电势增量; ΔE_{fd} 为励磁电压信号增量; ΔU_{PSS} 为PSS输出信号增量; ω_0 为同步转速; s 为拉普拉斯算子。

为方便后文推导,对图A1(a)所示模型进行简化。将 $G_M(s)$ 和 $H_{PSS}(s)$ 的输入由 $\Delta \omega$ 调整为 $\Delta \delta$,可得到图A1(a)的等效框图,如图A1(b)所示。将图中这种以 $\omega_0/[s(sM+K_D)]$ 为前向通道、其余部分为反馈通道的模型称为转子回路模型。在转子回路模型中,将虚线框中以 $\Delta \delta$ 为输入、 ΔP_{e2} 为输出的部分定义为 $G_Q(s)$ 。为了方便后续的分析,首先通过简单的等效变换,将 $G_Q(s)$ 分解为不包含 $H_{PSS}(s)$ 的 $G_{Q1}(s)$ 和包含 $H_{PSS}(s)$ 的 $G_{Q2}(s)$,形成简洁形式的转子回路模型,如图1所示。图中存在如下关系式:

$$G_Q(s) = G_{Q1}(s) + G_{Q2}(s) \quad (1)$$

$$G_{Q1}(s) = -K_2(K_3 + sT'_{d0} + G_{EX}(s)K_6)^{-1}(G_{EX}(s)K_5 + K_4) \quad (2)$$

收稿日期:2021-12-22;修回日期:2022-03-28

在线出版日期:2022-05-11

基金项目:中国南方电网公司科技项目(0002200000075480)

Project supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid(0002200000075480)

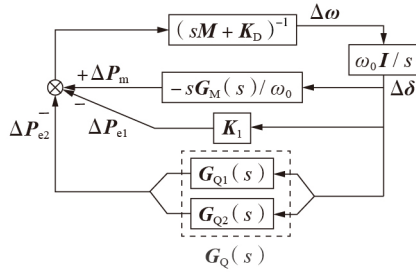


图1 简洁形式的转子回路模型

Fig.1 Rotor circuit model in concise form

$$G_{Q2}(s) = K_2 (K_3 + sT'_{d0} + G_{EX}(s)K_6)^{-1} sG_{EX}(s)H_{PSS}(s)/\omega_0 \quad (3)$$

上述简洁形式的转子回路模型更清晰地将多机系统分解为1个前向通道和3个反馈通道的形式,在后文中将使用该形式的模型开展稳定分析。

2 基于最小特征轨迹的稳定裕度

本节将基于简洁形式的转子回路模型并根据多输入-多输出 MIMO (Multi-Input Multi-Output) 系统的广义 Nyquist 判据,推导出基于最小特征轨迹的稳定裕度近似解析表达式。

2.1 基于最小特征轨迹的稳定裕度判据

由图1中简洁形式的转子回路模型可得系统的回差矩阵 $D(s)$ 的表达式为:

$$D(s) = I + \frac{\omega_0}{s} (sM + K_D)^{-1} \left(K_1 + G_Q(s) + \frac{s}{\omega_0} G_M(s) \right) = I + L(s) \quad (4)$$

式中: $L(s)$ 为开环传递函数矩阵。将 $s = j\omega$ 代入式(4),根据广义 Nyquist 判据,回差矩阵行列式 $\det(I + L(j\omega))$ 与坐标原点的距离即为稳定裕度;基于特征轨迹的 Nyquist 稳定判据见文献[14]。回差矩阵行列式与系统的特征轨迹关系见式(5)。

$$\det(I + L(j\omega)) = \prod_{k=1}^m \lambda_k(I + L(j\omega)) \quad (5)$$

式中: k 为机组编号; m 为电网机组总数; $\lambda_k(\cdot)$ 为矩阵的特征轨迹。由式(5)可知:系统的特征轨迹由回差矩阵 $I + L(j\omega)$ 的特征值曲线组成;采用本文所提转子回路模型,特征轨迹数目与机组总数相同。因此当电网有 m 台机组时, m 条特征轨迹围绕原点的环绕次数决定了闭环系统右半平面的极点数。

设 $\lambda_{\min}(I + L(j\omega))$ 为 $I + L(j\omega)$ 所有特征轨迹中距离原点最近的特征轨迹。当系统处于临界稳定状态时, $\lambda_{\min}(I + L(j\omega))$ 非常接近原点,而其余特征值的模均较大,故采用 $\lambda_{\min}(I + L(j\omega))$ 到原点的最短距离 $d\{(0,0), \lambda_{\min}(I + L(j\omega))\}$ 表示系统稳定裕度。又因为:

$$\lambda_{\min}(I + L(j\omega)) = 1 + \lambda_{-1}(L(j\omega)) \quad (6)$$

式中: $\lambda_{-1}(L(j\omega))$ 表示距离点 $(-1,0)$ 最近的 $L(j\omega)$ 特征轨迹。

因此可通过计算 $\lambda_{-1}(L(j\omega))$ 到点 $(-1,0)$ 的最短距离 $d\{(-1,0), \lambda_{-1}(L(j\omega))\}$,来表示系统稳定裕度,并将 $d\{(-1,0), \lambda_{-1}(L(j\omega))\}$ 所对应的特征值称为最小模特征值或最小特征值。显然,当 $\lambda_{-1}(L(j\omega)) = 0$ 时,闭环系统存在一个位于虚轴的特征值,此时系统处于临界稳定状态。

2.2 基于最小特征轨迹的稳定裕度近似解析表达式

最小特征值需要经过复杂的计算才能精确获得,且难以直观表现稳定裕度与电网参数的关系,不利于开展稳定分析。本节对矩阵 $L(j\omega)$ 进行相似变换,得到一个对角占优矩阵,其最小模对角元近似等于最小特征值,避免了迭代计算最小特征值,同时能够得到反映各个回路对最小特征值影响的解析表达式。由式(4)可知:

$$L(j\omega) = \frac{\omega_0}{j\omega} (j\omega M + K_D)^{-1} \times \left(K_1 + G_{Q1}(j\omega) + G_{Q2}(j\omega) + \frac{j\omega}{\omega_0} G_M(j\omega) \right) \quad (7)$$

由于 M 、 K_D 均为对角矩阵,故可将 $(j\omega M + K_D)^{-1}$ 分解为:

$$(j\omega M + K_D)^{-1} = (K_D^2 + \omega^2 M^2)^{-1} (K_D - j\omega M) \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)后可得:

$$L(j\omega) = - (K_D^2 + \omega^2 M^2)^{-1} M K_1 \omega_0 + (K_D^2 + \omega^2 M^2)^{-1} K_D K_1 \omega_0 / (j\omega) + (j\omega M + K_D)^{-1} G_{Q1}(j\omega) \omega_0 / (j\omega) + (j\omega M + K_D)^{-1} G_{Q2}(j\omega) \omega_0 / (j\omega) + (j\omega M + K_D)^{-1} G_M(j\omega) \quad (9)$$

为便于分析,将式(9)的各个分式分别定义为 K_1 相关回路 $L_{MK}(j\omega)$ 、阻尼相关回路 $L_{KD}(j\omega)$ 、励磁相关回路 $L_{GQ1}(j\omega)$ 、PSS 相关回路 $L_{GQ2}(j\omega)$ 以及原动机-调速器相关回路 $L_{GM}(j\omega)$,并将除 $L_{MK}(j\omega)$ 以外的另外4个分式之和表示为 $\Delta L(j\omega)$,即:

$$\begin{cases} L_{MK}(j\omega) = -\omega_0 (K_D^2 + \omega^2 M^2)^{-1} M K_1 \\ L_{KD}(j\omega) = (K_D^2 + \omega^2 M^2)^{-1} K_D K_1 \omega_0 / (j\omega) \\ L_{GQ1}(j\omega) = (j\omega M + K_D)^{-1} G_{Q1}(j\omega) \omega_0 / (j\omega) \\ L_{GQ2}(j\omega) = (j\omega M + K_D)^{-1} G_{Q2}(j\omega) \omega_0 / (j\omega) \\ L_{GM}(j\omega) = (j\omega M + K_D)^{-1} G_M(j\omega) \\ \Delta L(j\omega) = L_{KD}(j\omega) + L_{GQ1}(j\omega) + L_{GQ2}(j\omega) + L_{GM}(j\omega) \end{cases} \quad (10)$$

则有:

$$L(j\omega) = L_{MK}(j\omega) + L_{KD}(j\omega) + L_{GQ1}(j\omega) + L_{GQ2}(j\omega) + L_{GM}(j\omega) = L_{MK}(j\omega) + \Delta L(j\omega) \quad (11)$$

为简化表述,除特殊说明外,后文中所有出现的

频率响应矩阵或者由频率响应矩阵决定的其他矩阵或变量均省略 $(j\omega)$ 。可以注意到 L_{MK} 为实数阵。由于一般情况下矩阵 K_1 可对角化且 L_{MK} 的特征值及特征向量通常为实数,对 L_{MK} 进行特征分解后可得:

$$L_{MK} = -\omega_0 (K_D^2 + \omega^2 M^2)^{-1} M K_1 = U \Lambda U^{-1} \quad (12)$$

式中: Λ 为特征值矩阵; U 为右特征向量矩阵。将式(12)代入式(11)可得:

$$L = L_{MK} + \Delta L = U \Lambda U^{-1} + \Delta L = U (\Lambda + U^{-1} \Delta L U) U^{-1} = U S_M U^{-1} \quad (13)$$

式中: S_M 为 L 的相似矩阵。由相似矩阵的性质可知:

$$\lambda(L) = \lambda(\Lambda + U^{-1} \Delta L U) = \lambda(S_M) \quad (14)$$

至此,原问题转化为计算 L 的相似矩阵 S_M 特征值问题,即:

$$d\{(-1, 0), \lambda_{-1}(L)\} = d\{(-1, 0), \lambda_{-1}(S_M)\} = d\{(-1, 0), \lambda_{-1}(\Lambda + U^{-1} \Delta L U)\} \quad (15)$$

相似矩阵 S_M 具有很明显的对角占优特性。例如,一个6机11节点算例系统的相似矩阵对角元几乎对应于 S_M 也即 L 的全部特征值,这意味着相似矩阵的最小模对角元可作为系统稳定裕度。这是因为机电暂态模型中,假设 $K_D \approx 0$,矩阵 $L_{MK} \approx -\omega_0 M^{-1} K_1 / \omega^2$,这在很大程度上影响了 L 的特征值。

而在相似矩阵 S_M 中, ΔL 为包含电力系统控制回路的频率响应矩阵 L_{GQ2} 、 L_{GM} 的线性表达式,即:

$$S_M = \Lambda + U^{-1} \Delta L U = \Lambda + U^{-1} (L_{KD} + L_{GQ1} + L_{GQ2} + L_{GM}) U = \Lambda + U^{-1} L_{KD} U + U^{-1} L_{GQ1} U + U^{-1} L_{GQ2} U + U^{-1} L_{GM} U \quad (16)$$

假设相似矩阵 S_M 第1行第1列元素 $S_{M,11}$ 即为最小模元素,根据上文分析,新的稳定裕度 $S_{M,11}$ 具有很强的单输入单输出SISO(Single-Input Single-Output)系统参数裕度特征^[15],数学关系简单。下面将利用这一特点对原动机-调速器回路及PSS回路对稳定裕度的影响展开分析。

3 原动机-调速器回路对稳定裕度的影响

基于第2节推导的内容,本节将具体分析原动机-调速器回路对稳定裕度的影响。在相似矩阵 S_M 中原动机-调速器分量 $\bar{L}_{GM}$ 为:

$$\bar{L}_{GM} = U^{-1} L_{GM} U = U^{-1} (j\omega M + K_D)^{-1} G_M U \quad (17)$$

设 $V = (U^{-1})^T$ 为左特征向量矩阵,则式(17)可变为:

$$\bar{L}_{GM} = U^{-1} L_{GM} U = V^T L_{GM} U = \begin{bmatrix} v_1^T \\ \vdots \\ v_m^T \end{bmatrix} [L_{GM,1} \cdots L_{GM,m}] U = \begin{bmatrix} v_1^T L_{GM,1} & \cdots & v_1^T L_{GM,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_m^T L_{GM,1} & \cdots & v_m^T L_{GM,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{m1} & \cdots & u_{mm} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: v_i^T 为左特征向量矩阵中第 i 列向量的转置; $L_{GM,i}$ 为 L_{GM} 中第 i 列向量; u_{ij} 为右特征向量矩阵中第 i

行第 j 列元素。

当 $S_{M,11}$ 为最小模对角元时,可以将其看作稳定裕度。根据式(16)及式(18),原动机-调速器系统对稳定裕度的影响体现在 $\bar{L}_{GM}$ 第1行第1列元素 $\bar{L}_{GM,11}$, $\bar{L}_{GM,11}$ 的表达式为:

$$\bar{L}_{GM,11} = v_1^T L_{GM,1} u_{11} + \cdots + v_1^T L_{GM,m} u_{m1} = u_{11} v_{11} l_{11} + \cdots + u_{m1} v_{11} l_{1m} + \cdots + u_{11} v_{m1} l_{m1} + \cdots + u_{m1} v_{m1} l_{mm} = \text{sum}((v_1 u_1^T) \circ L_{GM}) \quad (19)$$

式中: v_{ij} 为 v_j^T 中第 i 个元素; l_{ij} 为 $L_{GM,j}$ 中第 i 个元素; u_1 、 v_1 分别为第一个特征值对应的右、左特征向量;“ $\circ$ ”表示其左右两侧矩阵的Hadamard积; $\text{sum}(\cdot)$ 为矩阵中所有元素的求和函数。由式(19)可知原动机-调速器回路对 $S_{M,11}$ 的作用仅取决于最小特征值对应的特征向量 u_1 、 v_1 ,与其他特征向量无直接关系。

将 L_{GM} 代入式(19),由于 L_{GM} 为对角矩阵,则有:

$$\bar{L}_{GM,11} = \text{sum}((v_1 u_1^T) \circ L_{GM}) = \text{sum}((v_1 u_1^T) \circ [(j\omega M + K_D)^{-1} G_M]) = u_{11} v_{11} \frac{G_{M1}}{j\omega M_1 + K_{D1}} + \cdots + u_{m1} v_{m1} \frac{G_{Mm}}{j\omega M_m + K_{Dm}} \quad (20)$$

式中: G_{Mi} 、 M_i 以及 K_{Di} 分别为 G_M 、 M 以及 K_D 的第 i 个对角元。式(20)为原动机-调速器传递函数与稳定裕度关系的解析表达式。由于在低频段和超低频段最小特征轨迹基本平行并靠近实轴,弱阻尼时其在实轴以下,负阻尼时其在实轴以上。且一般情况下, u_1 、 v_1 中各项为正实数,这意味着稳定分析中只需关注各原动机-调速器传递函数在虚轴上投影值的正负情况即可。如果 G_{Mi} 的相角滞后,且大于 90° ,则结合式(20)可以判断原动机-调速器对应的分量在虚轴上的投影值为正,这意味着该分量使得最小特征值靠近原点,恶化稳定性。

以水电机组和火电机组为例,分析其调速系统对超低频振荡模式的影响。水电机组原动机-调速器模型 $G_{Mh}(s)$ 如下:

$$G_{Mh}(s) = \frac{K_p s + K_i + K_D s^2}{b_p K_1 + s} \frac{1}{1 + T_G s} \frac{1 - T_W s}{1 + 0.5 T_W s} \quad (21)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_D 为微分系数; T_G 为伺服系统时间常数; T_W 为水流惯性时间常数; b_p 为永态下垂系数。火电机组原动机-调速器模型 $G_{Ms}(s)$ 如下:

$$G_{Ms}(s) = \frac{1}{R} \frac{1}{1 + T_{GS} s} \frac{1 + F_{HP} T_{RH} s}{(1 + T_{CH} s)(1 + T_{RH} s)} \quad (22)$$

式中: $T_{GS} = 1/(KR)$ 为调速器响应时间常数, R 为调速器下垂系数, K 为调速器积分环节增益; T_{CH} 为高压蒸汽容积时间常数; T_{RH} 为再热器时间常数; F_{HP} 为高压缸产生功率在总汽轮机功率中占比。显然,水轮机的相频特性大幅滞后于汽轮机,如果调速器参数整

定不当,则易产生超低频振荡。这与采用传统的统一频率模型获得的结论^[16]一致。

区域振荡和局部振荡的分析方法与超低频振荡类似,仅根据各机组 G_{Mi} 的相角即可判断其对稳定性的影响:当 G_{Mi} 的相角滞后且超过 90° 时,将削弱系统稳定性;当 G_{Mi} 的相角滞后但是未超过 90° 时,可以增强系统稳定性。而在低频段 G_{Mi} 的输出有所降低,可忽略其影响。

4 PSS回路对稳定裕度的影响

本节重点分析了PSS对稳定裕度影响。 ΔL 中与PSS相关的分量 L_{GQ2} 表达式为:

$$L_{GQ2} = \frac{\omega_0}{j\omega} (j\omega M + K_D)^{-1} G_{Q2} = \underbrace{(j\omega M + K_D)^{-1} K_2 (K_3 + j\omega T'_{d0} + G_{EX} K_6)^{-1} G_{EX}}_{H_{pvr}} H_{PSS} = (j\omega M + K_D)^{-1} H_{pvr} H_{PSS} \quad (23)$$

式中: H_{pvr} 为PSS输出信号经过的前向通道的传递函数矩阵^[17]。

设 f_i 为矩阵 $(j\omega M + K_D)^{-1} H_{pvr}$ 的第 i 个列向量, h_i 为各PSS的传递函数,可得:

$$L_{GQ2} = (j\omega M + K_D)^{-1} H_{pvr} H_{PSS} = \begin{bmatrix} f_1 & \cdots & f_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 & & \\ & \ddots & \\ & & h_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 h_1 & \cdots & f_m h_m \end{bmatrix} \quad (24)$$

相似矩阵 S_M 中与 L_{GQ2} 相关的分量 $\bar{L}_{GQ2}$ 的表达式为:

$$\bar{L}_{GQ2} = U^{-1} L_{GQ2} U = V^T L_{GQ2} U = \begin{bmatrix} v_1^T \\ \vdots \\ v_m^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 h_1 & \cdots & f_m h_m \end{bmatrix} U = \begin{bmatrix} v_1^T f_1 h_1 & \cdots & v_1^T f_m h_m \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_m^T f_1 h_1 & \cdots & v_m^T f_m h_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{m1} & \cdots & u_{mm} \end{bmatrix} \quad (25)$$

设 f_{ij} 为 f_j 中第 i 行元素,可得PSS对 $S_{M,11}$ 的贡献为:

$$\begin{aligned} \bar{L}_{GQ2,11} &= v_1^T f_1 h_1 u_{11} + \cdots + v_1^T f_m h_m u_{m1} = \\ &= u_{11} v_{11} f_{11} h_1 + \cdots + u_{m1} v_{11} f_{m1} h_m + \cdots + \\ &= u_{11} v_{m1} f_{m1} h_1 + \cdots + u_{m1} v_{m1} f_{mm} h_m = \\ &= \underbrace{(u_{11} v_{11} f_{11} + \cdots + u_{11} v_{m1} f_{m1})}_{F_{uw,1}} h_1 + \cdots + \\ &= \underbrace{(u_{m1} v_{11} f_{1m} + \cdots + u_{m1} v_{m1} f_{mm})}_{F_{uw,m}} h_m = \\ &= \begin{bmatrix} F_{uw,1} & \cdots & F_{uw,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_m \end{bmatrix} = \\ &= F_{uw} \text{diag}(H_{PSS}) \end{aligned} \quad (26)$$

式中: $\text{diag}(H_{PSS})$ 为由 H_{PSS} 矩阵对角元组成的列向量; $F_{uw,i}$ 为式中相应元素之和。由式(26)可知,PSS

对 $S_{M,11}$ 的作用可以由各PSS传递函数线性相加得到。除分析作用外,式(26)还可以用作PSS参数整定,此时 F_{uw} 的作用与留数类似,能够据其推知PSS中应该补偿的角度。

进一步证明利用最小特征轨迹法对PSS参数进行整定与理想相频特性法所得结果的一致性。由式(26)可知,最小特征轨迹法中PSS对稳定裕度的贡献可等效为各PSS传递函数的线性叠加,故以1台PSS为例进行介绍。考虑一个有3台同步机的电网,那么PSS对该电网稳定裕度的影响为:

$$\bar{L}_{GQ2,11} = (u_{11} v_{11} f_{11} + u_{11} v_{21} f_{21} + u_{11} v_{31} f_{31}) h_1 \quad (27)$$

根据式(27),PSS的参数应该满足式(28)所示相角条件,使得最小特征轨迹“垂直下移”,尽量远离复平面点实轴处的点 $(-1, 0)$ 。

$$\arg((u_{11} v_{11} f_{11} + u_{11} v_{21} f_{21} + u_{11} v_{31} f_{31}) h_1) = -90^\circ \quad (28)$$

式中: $\arg(\cdot)$ 为求相角函数。在超低频振荡和区域振荡模式频段,矩阵 H_{pvr} 严格列对角占优(即矩阵中每个主对角元素的模都大于与其同列的其他元素的模的总和),此时 $f_{11} \gg f_{21} + f_{31}$,又有向量 u_1, v_1 中的元素均为正实数,故式(28)可以简化为:

$$\arg(f_{11} h_1) \approx -90^\circ \quad (29)$$

在局部振荡模式频段,矩阵 v_1, u_1^T 呈现“一元独大”的结构,即只有1个对角元素非常大,其余所有元素都非常小。此时式(29)的准确度更高。而理想相频特性法中根据 H_{pvr} 的对角元相角整定PSS参数,即根据式(30)所示条件进行整定^[17]。

$$\arg(H_{pvr,11} h_1) = 0^\circ \quad (30)$$

再根据 f_{ij} 的定义,即:

$$(j\omega M + K_{D1})^{-1} H_{pvr,11} = f_{11} \quad (31)$$

由式(30)、(31)可得:

$$\arg((j\omega M + K_{D1}) f_{11} h_1) = 0^\circ \quad (32)$$

当 $K_{D1} = 0$ 时,有:

$$\arg(f_{11} h_1) = -90^\circ \quad (33)$$

综上所述,理想相频特性法与最小特征轨迹法所得的PSS补偿相角基本一致。另外,在超低频段, $H_{pvr}(j\omega)$ 的对角元相角接近 0° ,由上面2种方法推得PSS需要补偿的相角也接近 0° ,这又进一步验证了传统阻尼转矩法的结论^[18]。

5 算例分析

本节首先应用最小特征轨迹法计算原动机-调速器回路对低频振荡模式的影响,以及PSS回路对超低频振荡模式的影响。然后采用最小特征轨迹法、理想相频特性法以及留数法对PSS输出的补偿相角进行计算,并对结果进行分析比较。最后在IEEE 6机11节点、IEEE 19机118节点、新西兰10机39节点、波兰2383节点系统中进行验证。算例中,

一半负荷采用恒定功率模型,另一半负荷采用恒定阻抗模型。

5.1 原动机-调速器回路对低频振荡模式的影响分析

在 IEEE 6 机 11 节点系统中设置 0.505 Hz 低频振荡,基于最小特征轨迹法计算了系统中的 6 台原动机-调速器系统对系统稳定裕度的影响,结果如图 2 所示。图中,圆盘刻度代表相角,向量代表式(20)中相加的各个表达式,向量数目与机组数目一致,向量的模值在本文中不做讨论。由图可知,水电机组原动机-调速器回路对系统稳定性产生了负面影响,即相应的向上的向量使得最小特征轨迹向着包络点 $(-1, 0)$ 的方向移动,其原因在于水电机组固有的非最小相位特性(即水电机组相频响应特性大幅滞后)。相反,火电机组的原动机-调速器回路对系统稳定性产生了正面影响,即其对应的向量使最小特征轨迹向远离点 $(-1, 0)$ 的方向移动。

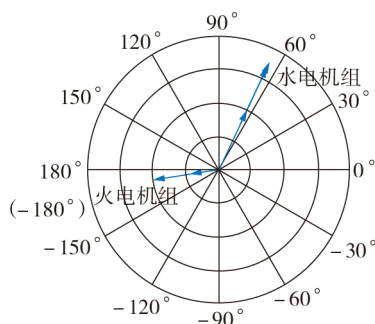


图2 IEEE 6机11节点系统各机组原动机-调速器回路对稳定裕度的影响

Fig.2 Influence of each unit prime motor and governor loop on stability margin of IEEE 6-machine 11-bus system

5.2 PSS回路对超低频振荡模式的影响分析

本节利用最小特征轨迹法,计算 IEEE 19 机 118 节点系统中安装 PSS 后输出的补偿相角,并对安装 PSS 后对系统稳定性的影响进行分析,如图 3 所示。本文 IEEE 19 机 118 节点系统中未安装 PSS 的机组共 14 台,因此图中的向量个数为 14。由式(26)可得

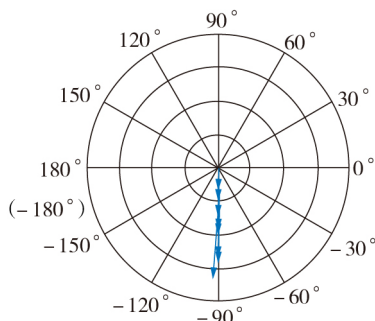


图3 IEEE 19机118节点系统超低频模式下的 F_w 中向量
Fig.3 Vectors of F_w for ultra-low frequency oscillation mode of IEEE 19-machine 118-bus system

F_w 各元素,即为图 3 所示 14 个向量,再由式(29)得到各机组 PSS 的补偿相角,其值约为 -5° 。

常规的双输入型电力系统稳定器 PSS2B(dual-input Power System StaBilizer)在超低频段只有隔直环节 $sT_w(1+sT_w)$ 起实质性作用,取 $T_w=5$ s,此时 PSS2B 的补偿相角约为 30° ,仍然贡献阻尼但并非最佳补偿角度。而多频段稳定器(以 PSS4B 型多频段 PSS 为例,下文简称 PSS4B)的补偿相角接近于 0° ,更接近本算例中需要补偿的角度。分别给出未安装 PSS、安装 PSS2B 以及 PSS4B 时系统在超低频段的最小特征轨迹,如图 4 所示,图中箭头表示从 0 扫频到 0.1 Hz 时最小特征值的移动方向。

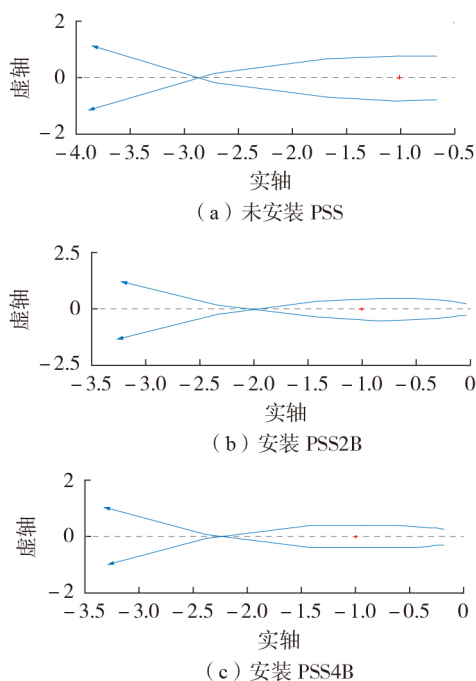


图4 IEEE 19机118节点系统在 PSS 的 3 种安装情况下超低频段最小特征轨迹

Fig.4 Minimum characteristic locus of IEEE 19-machine 118-bus system under 3 kinds of PSS installation situations

由图 4(a)可知,未安装 PSS 时最小特征轨迹包络点 $(-1, 0)$,意味着此时系统处于负阻尼状态,且最小特征值为 $(-1, j0.798)$ 。由图 4(b)可知,安装 PSS2B 后最小特征值为 $(-1, j0.441)$,特征轨迹向着不包络点 $(-1, 0)$ 的方向移动。由图 4(c)可知,安装 PSS4B 后最小特征值为 $(-1, j0.389)$,特征轨迹进一步向不包络点 $(-1, 0)$ 的方向移动。

5.3 不同系统下 PSS 的相角补偿结果

以 IEEE 6 机 11 节点、新西兰 10 机 39 节点以及波兰 2 383 节点系统为例,分别采用最小特征轨迹法、理想相频特性法、留数法对各机组进行 PSS 相角补偿计算,计算结果分别见附录 A 图 A2—A4,图中

蓝色向量与 -90° 之间的相角即为PSS需要补偿的相角。由图可知3种方法计算的补偿角度基本一致,进一步证明了最小特征轨迹法的准确性。

5.4 特征轨迹稳定裕度与特征值稳定裕度的对比

为了验证最小特征轨迹法求取稳定裕度的准确性,在IEEE 6机11节点系统中设置受端有功负荷由1.55 MW逐步增加为2 MW,分别利用常规特征值法和本文所提最小特征轨迹法计算系统的临界特征值。将特征值法求得的临界特征值实部作为系统的稳定裕度,将最小特征轨迹法求得的最小特征值虚部作为系统的稳定裕度,二者的对比结果见附录A图A5。由图可知,2种方法下系统稳定裕度的变化趋势具有一致性,证明了最小特征轨迹法求取稳定裕度的准确性。

6 结论

最小特征轨迹法是SISO系统的向量裕度法在MIMO系统中的扩展。初步研究表明,结合本文提出的相似变换技巧,最小特征轨迹法具有SISO系统向量裕度法的优点,采用该方法后系统的稳定裕度可通过向量线性叠加的解析关系进行简单表示。计算结果表明,最小特征轨迹法能够有效地分析各回路和各机组对系统稳定性的贡献,并为控制器参数的整定提供方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 董新洲,汤涌,卜广全,等. 大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3107-3119.
DONG Xinzhou, TANG Yong, BU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3119.
- [2] 杜文娟,王海风. 电力系统低功率振荡模式分析理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 27-31.
- [3] 周靖皓. 基于值集法的电力系统小干扰参数稳定性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
ZHOU Jinghao. Power system small signal parametric stability analysis based on value set approach[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [4] 马燕峰,郑力文,霍亚欣,等. 虚拟同步发电机接入电力系统的阻尼转矩分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 166-171.
MA Yanfeng, ZHENG Liwen, HUO Yaxin, et al. Damping torque analysis of virtual synchronous generator connected to power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 166-171.
- [5] GIBBARD M J, POURBEIK P, VOWLES D J. Small-signal stability, control and dynamic performance of power systems[M]. Adelaide, Australia: University of Adelaide Press, 2015: 227-235.
- [6] ROUCO L, PAGOLA F L. Eigenvalue sensitivities for design of power system damping controllers[C]//IEEE Conference on

Decision and Control. Orlando, USA: IEEE, 2001: 3051-3055.

- [7] 江崇熙,石鹏,黄伟,等. 考虑多振荡模式的多频段电力系统稳定器参数整定方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 142-149.
JIANG Chongxi, SHI Peng, HUANG Wei, et al. Parameter setting method for multi-band power system stabilizer considering multiple oscillation modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 142-149.
- [8] 周靖皓,石鹏,甘德强,等. 值集法在大电网鲁棒稳定分析中的实现及与 μ 方法比较[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 98-104.
ZHOU Jinghao, SHI Peng, GAN Deqiang, et al. Implementation of value set approach in robust stability analysis of large power systems and its comparison with μ -based approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 98-104.
- [9] SHI P, ZHOU J H, GAN D Q, et al. A rational fractional representation method for wind power integrated power system parametric stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 7122-7131.
- [10] 聂永辉,张艺川,马彦超,等. 计及时滞影响的电力系统 H_∞ 阻尼控制[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 96-100.
NIE Yonghui, ZHANG Yichuan, MA Yanchao, et al. H_∞ damping control of power system with time delay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 96-100.
- [11] 刘豹,唐万生. 现代控制理论[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 157-177.
- [12] 刘宪林,丁超杰,王子琦,等. 电力系统小扰动稳定的直接法分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 1-4.
LIU Xianlin, DING Chaojie, WANG Ziqi, et al. Direct method to analyze small signal stability of electric power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 1-4.
- [13] 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: 238-248.
- [14] MACIEJOWSK J M. Multivariable feedback design[M]. New York, USA: Addison-Wesley Publishers Ltd., 1989: 59-62.
- [15] ASTRÖM K J, MURRAY R M. Feedback systems: an introduction for scientists and engineers[M]. Princeton, USA: Princeton University Press, 2010: 267-290.
- [16] JIANG C X, ZHOU J H, SHI P, et al. Ultra-low frequency oscillation analysis and robust fixed order control design[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 104: 269-278.
- [17] GIBBARD M J, VOWLES D J. Reconciliation of methods of compensation for PSSs in multimachine systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 463-472.
- [18] 李青兰,黄伟,陈磊,等. 电力系统稳定器影响频率振荡的机理及阻尼分析方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 67-73.
LI Qinglan, HUANG Wei, CHEN Lei, et al. Mechanism and damping analysis method of impact of power system stabilizer on frequency oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 67-73.

作者简介:



黄伟

黄伟(1979—),男,高级工程师,博士,主要研究方向为电网运行与控制(E-mail: haxwell@163.com);

张清波(1994—),女,博士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail: zhangqingbo@zju.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

(下转第164页 continued on page 164)

系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749, 6016.

LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749, 6016.

作者简介:

冉启胜(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为直流配电网保护与控制(E-mail: 1428376917@qq.com);



冉启胜

张哲(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护、新能源及超导技术(E-mail: zz_mail2002@163.com);

韩杰祥(1995—), 男, 博士研究生, 通信作者, 主要研究方向为交直流混合配电网的保护与控制技术(E-mail: jiexianghan@163.com)。

(编辑 任思思)

Pilot protection scheme for DC distribution network based on improved dynamic time warping distance algorithm

RAN Qisheng, ZHANG Zhe, HAN Jiexiang, YIN Xianggen, REHEMAN Yushan, LIU Binyan

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: After active current-limiting control is adopted in DC distribution network constructed by the fault-blocking converter, the characteristics of short circuit current will be complicated, which severely affect the performance of the protection. Based on the analysis of short circuit current characteristics under active current-limiting control of DC distribution network, a pilot protection scheme based on improved DTW (Dynamic Time Warping distance) algorithm is proposed according to the difference in current waveforms on both sides of the line during internal and external faults. The DTW is calculated by the time series of current sampling values on both sides of the line. Then, the fault line can be identified according to the feature that the DTW value under internal fault is much larger than that under external fault. The starting criterion is constituted by voltage gradient to self-calibrate the starting time of DTW algorithm. Furthermore, a weighting function is introduced to improve the DTW algorithm to suppress edge effects. As a result, the influence of synchronization errors on protection is effectively reduced, and protection reliability is improved. Case analysis shows that the proposed protection scheme can correctly distinguish internal and external faults in different power grid operation modes with strong adaptability. In the meantime, the transition resistance and distributed capacitance current can be well tolerated.

Key words: DC distribution network; active current-limiting; pilot protection; dynamic time warping distance; synchronization error

(上接第156页 continued from page 156)

Minimum characteristic loci method for power system small disturbance stability analysis

HUANG Wei¹, ZHANG Qingbo², XU Hao², WU Simin², GAN Deqiang²

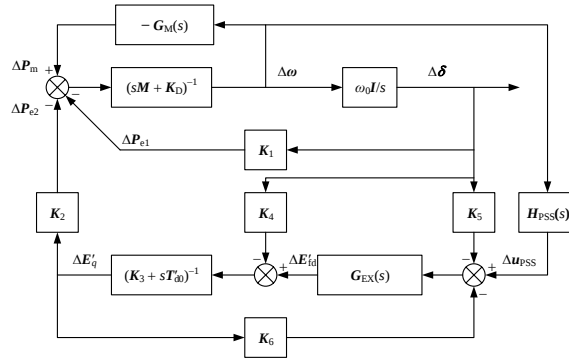
(1. Yunnan Electric Power Dispatching and Control Center, Kunming 650011, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

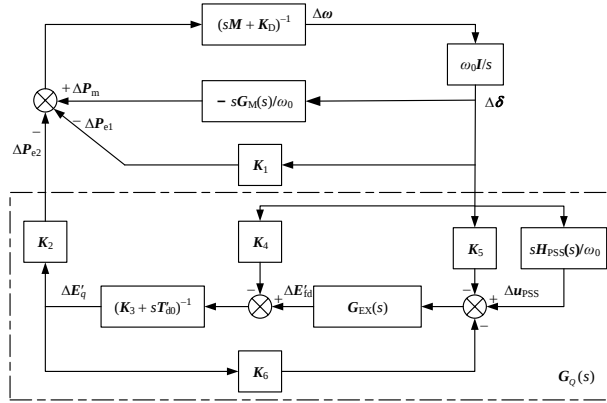
Abstract: A small disturbance stability analysis method based on Nyquist characteristic loci for multi-input multi-output system is proposed, which can quantify the contributions of turbine-governor loop and additional excitation control loop to stability margin. Firstly, a concise Heffron-Phillips model is obtained through block diagram transformation, and then a new stability margin is defined according to the relationship between the generalized Nyquist curve and characteristic loci. Based on the model mentioned above, a linear analytical expression of the stability margin is derived, which includes the turbine-governor loop and the additional excitation control loop, so that their influence on stability margin can be shown clearly. In addition, the proposed method can also be used as the controller parameter setting. Finally, the accuracy and effectiveness of the proposed method are proved by several cases.

Key words: electric power systems; small disturbance stability; generalized Nyquist curve; characteristic loci; phase-angle compensation

附录 A



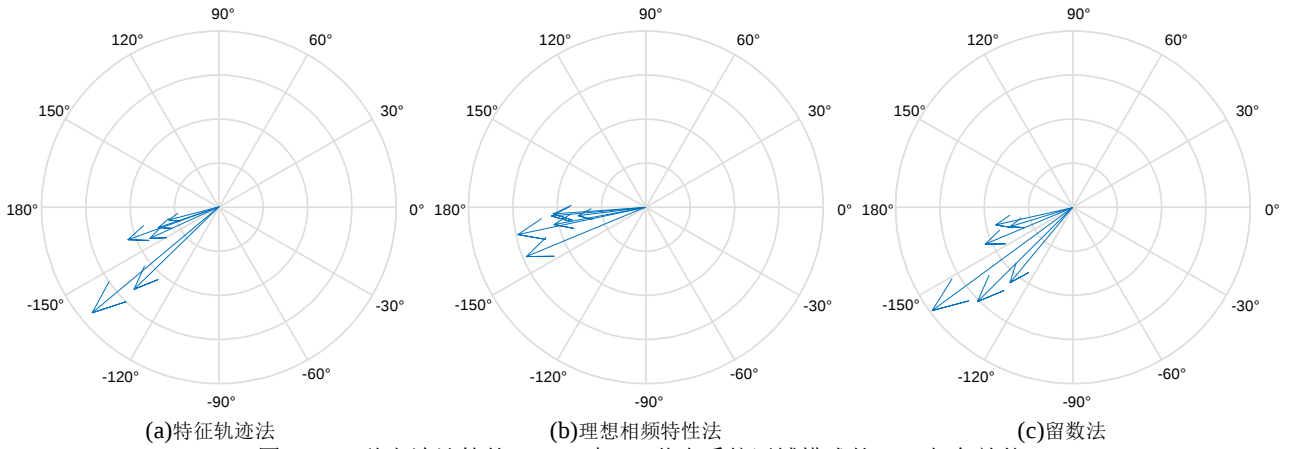
(a) 小干扰稳定分析的 Heffron-Phillips 模型



(b) 转子回路模型

图 A1 Heffron-Phillips 模型框图

Fig.A1 Block diagram of Heffron-Phillips model



(a) 特征轨迹法

(b) 理想相频特性法

(c) 留数法

图 A2 3 种方法计算的 IEEE 6 机 11 节点系统区域模式的 PSS 相角补偿

Fig.A2 PSS phase-angle compensation for inter-area mode of IEEE 6-machine 11-node system by three calculative methods

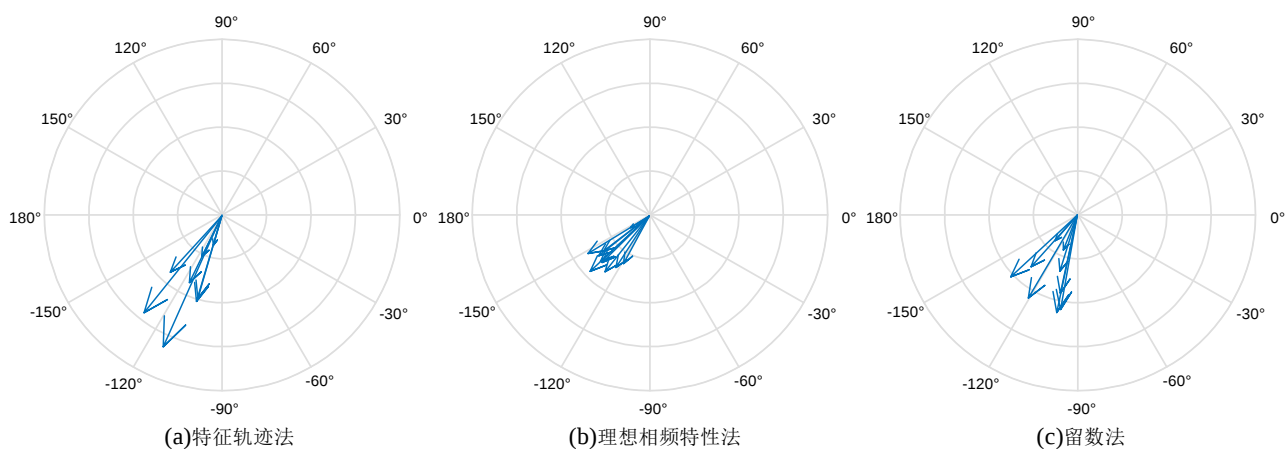


图 A3 3 种方法计算的新西兰 39 节点系统的 PSS 相角补偿

Fig.A3 PSS phase-angle compensation for New Zealand 39-node system by three calculative methods

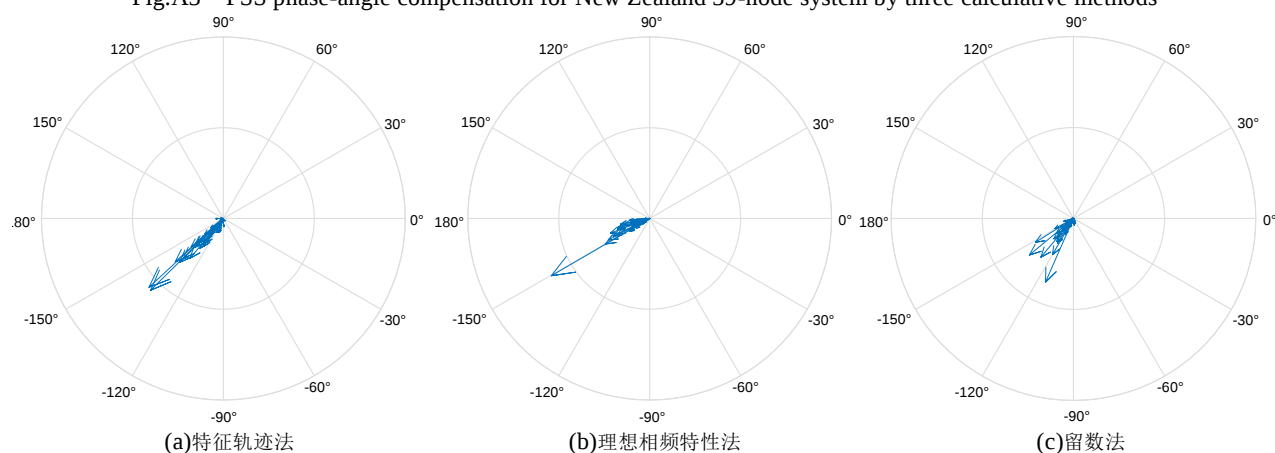


图 A4 3 种方法计算的波兰 2383 系统的 PSS 相角补偿

Fig.A4 PSS phase-angle compensation for Poland 2383-node system by three calculative methods

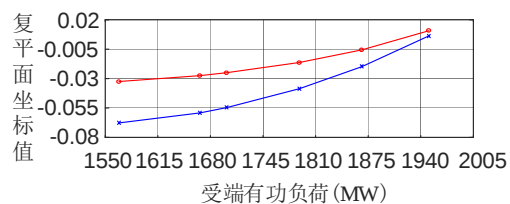


图 A5 IEEE 6 机 11 节点系统最小特征值虚部和系统临界特征值实部

Fig.A5 Imaginary parts of minimum eigenvalues and real parts of system critical eigenvalues of IEEE 6-machine 11-node system