

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201533

面向区域间振荡模式的电力系统小扰动惯量域构建

刘 铖, 赵晓洋, 张宇驰, 于思瑶

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012)

摘要: 为提升低惯量电力系统的小干扰稳定性, 给出保障适应新能源发展的合理惯量裕度, 并明确惯量分布对于互联系统小干扰稳定性的影响规律。研究了惯量分布对系统区域间振荡模式的影响规律, 构建了面向区域间振荡的电力系统小扰动惯量域(Small Signal Inertia Region, SSIR)。首先, 基于部分惯量中心(Part of the Center of Inertia, PCOI)等值方法和多项式 Leverrier 解法, 构建了等值两机系统区间振荡模式阻尼比解析式。在此基础上, 依据临界阻尼比构建了计及小干扰稳定约束的惯量域。进而, 对区域互联系统惯量分布和小干扰稳定性之间的联系进行解析。最后, 对惯量域进行全面分析, 并在新能源系统中进行了初步验证。仿真结果表明, 所提出的计算方法能够实现电力系统小扰动惯量域的准确、快速构建, 增强低惯量电力系统小干扰稳定性的评估和监控能力, 并为新能源惯量域的构建提供理论指导。

关键词: 新能源; 区域间振荡模式; 小干扰稳定; 状态矩阵; 阻尼比; 惯量域

Construction of a small signal inertia region of a power system for inter-area oscillation mode

LIU Cheng, ZHAO Xiaoyang, ZHANG Yuchi, YU Siyao

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,
Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

Abstract: In order to improve the small-signal stability of a low inertia power system, a reasonable margin of inertia should be provided to ensure the development of new energy sources, and the influence of the inertia distribution on the stability of the system with small signals should be clarified. This paper studies the influence of the inertia distribution on the inter-regional oscillation mode of the system, and constructs a Small Signal Inertia Region (SSIR) of the power system for inter-regional oscillation. First, based on the Part of the Center of Inertia (PCOI) equivalent method and the polynomial Leverrier solution method, an equivalent two-machine system interval oscillation mode damping ratio analytical formula is constructed. Then, from the critical damping ratio, the inertia domain that takes into account the small disturbance stability constraints is constructed. Further, it analyzes the relationship between the inertia distribution of the regional interconnection system and small-signal stability. Finally, a comprehensive analysis of the inertia region is carried out, and a preliminary verification is carried out in the renewable energy system. The simulation results show that the calculation method proposed in this paper can realize the accurate and rapid construction of the small signal inertia region of the power system, enhance the evaluation and monitoring ability of the small signal stability of the low inertia power system, and provide theoretical guidance for research on the renewable energy inertia region.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900100) and the National Natural Science Foundation of China (No. 52007027).

Key words: renewable energy; inter-area oscillation mode; small signal stability; state matrix; damping ratio; inertia region

0 引言

随着以风电和光伏为代表的新能源的大规模开

发利用, 大量的新能源场/站并入主干网架, 新能源发电的容量在电力系统中的占比不断提高^[1-2], 现代电力系统正逐渐演变为以电力电子设备高渗透率为特征的电力电子化电力系统^[3-5], 这使电力系统的惯量水平大大降低。近年来, 电力电子化电力系统的惯量支撑能力削弱现象已经引发了多起停电事故^[6-7]。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900100);
国家自然科学基金项目资助(52007027)

这些事故带来了比较深刻的教训：电力系统中必须设置保障新能源发展的合理转动惯量裕度，这对于小扰动下电力系统的安全稳定运行具有重要意义，但是目前对于低惯量电力系统的研究主要集中于频率稳定性方向^[8-9]，对于保障系统区域间振荡模式小干扰稳定性的合理惯量裕度鲜有人涉及，且惯量变化对于系统小干扰稳定性的影响究竟如何也有待研究。因此，如何科学衡量并有效改善低惯量系统的小干扰稳定性已成为电网规划和调度运行中需要关注的重要问题^[10-16]。

在弱互联电网中很容易出现低频振荡现象，低频振荡加剧有时会导致整个互联系统的崩溃^[17]。电力系统的低频振荡模式一般可分为区域间振荡模式和局部振荡模式^[18]，其区域间振荡模式振荡频率低，影响范围广，它的存在将严重限制系统间功率的传输，甚至威胁到系统的安全运行。因此有必要针对惯量分布和区域间振荡模式之间的关系进行研究，并给出满足系统区域间振荡模式小干扰稳定约束的电力系统惯量域，从而更好地指导系统的惯量优化配置，为保障电力系统的安全稳定运行提供理论基础。

已有学者对惯量分布和小干扰稳定性之间的关系进行了初步的研究。文献[19]初步推导了区域振荡模式与不同区域机组等值惯量之间的关系；文献[20]利用摇摆方程来描述网络节点的频率动态响应，并通过优化惯量分布提高振荡模式阻尼比；在文献[20]的基础上，文献[21]以阻尼最优化为目标来确定系统惯量空间分布；文献[22]利用简化模型推导惯量与阻尼比的解析关系，最后通过阻尼比最大化来确定惯量分布；文献[23]研究了一种含阻尼环节的电流源型风电机组虚拟同步控制策略，并进行了虚拟同步控制外环和电流控制内环设计；文献[24]以 H_2 和 H_∞ 范数为指标定量分析了同步发电机与虚拟同步机的频率响应特性，探讨了虚拟同步机的虚拟惯量与电气阻尼配置问题。文献[25]提出了基于 STATCOM/BESS 强化风机 VSG 虚拟惯性的协同控制方法。上述文献主要从惯量分布对于系统阻尼和频率稳定性两个方面的影响出发进行了一些有益的工作，但仍存在以下需要研究的方向：① 惯量变化究竟是如何影响系统小干扰稳定性的；② 惯量变化后，保障系统区域间振荡模式小干扰稳定性的惯量裕度和范围究竟是多少。

为解决上述问题，本文首先基于部分惯量中心 (Part of the Center of Inertia, PCOI) 等值方法和多项式的 Leverrier 解法推导区域间振荡模式阻尼比与惯

量之间的关系式，由此给出保障系统区域间振荡模式小干扰稳定性的合理惯量裕度，并将其定义为电力系统小扰动惯量域 (Small Signal Inertia Region, SSIR)；继而研究区域惯量分布对系统区域间振荡模式的影响，给出惯量影响规律；最后通过四机系统和十机系统仿真，验证所提惯量域构建方法和惯量影响规律的可行性和有效性，并为新能源惯量域的构建提供理论指导。

1 小扰动下等值两机电力系统建模

1.1 基于部分惯量中心等值方法的两机系统搭建

多机系统小干扰稳定性研究主要通过模态分析的方法来进行，从模态信息中可以获得系统全部振荡模式以及相关息。在区域互联系统中，区域间振荡模式发电机组的模态向量信息对应于 2 个等值发电机群，等值发电机群内部的模态向量的相位差很小，且两个发电机群间模态向量的相位差接近 180° ；因此，对于区域间振荡模式，可以将任意多机系统简化为两机系统进行研究。

由于电力系统的低频振荡主要表现为两个发电机群之间的相对摇摆，如果把这两个发电机群定义为发电机群 X 和发电机群 Y，机群内的发电机用 i, j 来表示。则可用部分惯量中心^[26-27]等值方法把这两个机群分别等值为两台发电机 G1 和 G2，如图 1 所示。

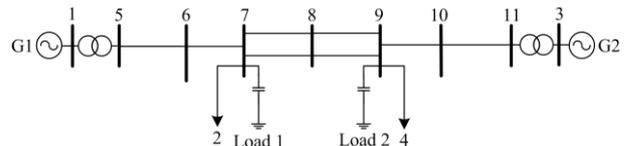


图 1 两机系统等值电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of two-generator system

设原系统任一区域内各发电机线性化后的转子运动方程为

$$M_i \Delta \dot{\delta}_i + D_i \Delta \delta_i = \Delta P_{mi} - \Delta P_{ei} \quad (1)$$

式中： M_i 为发电机 i 的惯性时间常数， $M = 2H$ ， H 为发电机惯量； $\Delta \delta_i$ 为发电机 i 功角差的微分； ΔP_{mi} 为发电机 i 的机械功率； ΔP_{ei} 为发电机 i 的电磁功率。

将该区域内所有发电机的转子运动方程相加，可以得到区域等效转子运动方程：

$$\sum_i M_i \Delta \dot{\delta}_i + \sum_i D_i \Delta \delta_i = \sum_i \Delta P_{mi} - \sum_i \Delta P_{ei} \quad (2)$$

发电机采用经典二阶模型并计及阻尼，两机等值系统的状态方程可以用式(3)来表示。

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta}_1 \\ \Delta \dot{\omega}_1 \\ \Delta \dot{\delta}_2 \\ \Delta \dot{\omega}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{11}}{M_1} & -\frac{D_1}{M_1} & -\frac{K_{12}}{M_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_0 \\ -\frac{K_{21}}{M_2} & 0 & -\frac{K_{22}}{M_2} & -\frac{D_2}{M_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \omega_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta \omega_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$M_1 = \sum_{i \in X} M_i, \quad M_2 = \sum_{j \in Y} M_j \quad (4)$$

$$\Delta \delta_1 = \frac{\sum_{i \in X} M_i \Delta \delta_i}{M_1}, \quad \Delta \delta_2 = \frac{\sum_{j \in Y} M_j \Delta \delta_j}{M_2} \quad (5)$$

$$D_1 = \sum_{i \in X} \alpha_i D_i, \quad D_2 = \sum_{j \in Y} \beta_j D_j \quad (6)$$

$$\alpha_i = \frac{\Delta \delta_i}{\Delta \delta_X}, \quad i \in X, \quad \beta_j = \frac{\Delta \delta_j}{\Delta \delta_Y}, \quad j \in Y \quad (7)$$

$$K_{XX} = \sum_{i \in X} \sum_{j \in X} \alpha_i K_{ij}, \quad K_{YY} = \sum_{i \in Y} \sum_{j \in Y} \beta_j K_{ij} \quad (8)$$

式中: α 、 β 为权系数; K_{ij} 为发电机的同步力矩系数; D_i 、 D_j 分别为发电机 i 、 j 的阻尼系数。

1.2 基于多项式的 Leverrier 解法的等值两机系统特征方程计算

在二机系统中, 四阶特征矩阵的求解比较复杂, 无法将 $|\lambda I - \mathbf{A}|$ 直接展开, 故本文通过高阶特征多项式的 Leverrier 解法^[28]得出四阶特征多项式的表达形式, 进而得到等值两机系统区域间振荡模式阻尼比的解析式。

令

$$|\lambda I - \mathbf{A}| = \lambda^4 + a_3 \lambda^3 + a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_0 = 0 \quad (9)$$

如果定义:

$$\begin{cases} \mathbf{B}_{n-1} = \mathbf{I}_n \\ \mathbf{B}_{n-2} = a_{n-1} \mathbf{I}_n + \mathbf{A} \mathbf{B}_{n-1} \\ \mathbf{B}_{n-3} = a_{n-2} \mathbf{I}_n + \mathbf{A} \mathbf{B}_{n-2} \\ \vdots \\ \mathbf{B}_1 = a_2 \mathbf{I}_n + \mathbf{A} \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{B}_0 = a_1 \mathbf{I}_n + \mathbf{A} \mathbf{B}_1 \end{cases} \quad (10)$$

则有

$$\begin{cases} a_{n-1} = -t_r(\mathbf{A} \mathbf{B}_{n-1}) \\ a_{n-2} = -\frac{1}{2} t_r(\mathbf{A} \mathbf{B}_{n-2}) \\ a_{n-3} = -\frac{1}{3} t_r(\mathbf{A} \mathbf{B}_{n-3}) \\ \vdots \\ a_1 = -\frac{1}{n-1} t_r(\mathbf{A} \mathbf{B}_1) \\ a_0 = -\frac{1}{n} t_r(\mathbf{A} \mathbf{B}_0) \end{cases} \quad (11)$$

式中, t_r 为矩阵的迹, 即主对角线元素之和。

对所给的等值两机系统的状态矩阵 \mathbf{A} 求解可得

$$\begin{cases} a_3 = -t_r \mathbf{A} = -\frac{D_1}{M_1} - \frac{D_2}{M_2} \\ a_2 = -\frac{1}{2} t_r(\mathbf{A} \mathbf{B}_2) = \frac{K_{11}}{M_1} + \frac{K_{22}}{M_2} + \frac{D_1 D_2}{M_1 M_2} \\ a_1 = -\frac{1}{3} t_r(\mathbf{A} \mathbf{B}_3) = \frac{K_{11} D_2}{M_1 M_2} + \frac{K_{22} D_1}{M_1 M_2} \\ a_0 = -\frac{1}{4} t_r(\mathbf{A} \mathbf{B}_0) = \frac{K_{11} K_{22}}{M_1 M_2} - \frac{K_{12} K_{21}}{M_1 M_2} \end{cases} \quad (12)$$

整理可得等值两机系统的特征方程为

$$\begin{aligned} f(\lambda) = & \lambda^4 + \frac{D_1 M_2 + D_2 M_1}{M_1 M_2} \lambda^3 + \\ & \frac{K_{11} M_2 + K_{22} M_1 + D_1 D_2}{M_1 M_2} \lambda^2 + \\ & \frac{K_{11} D_2 + K_{22} D_1}{M_1 M_2} \lambda + \frac{K_{11} K_{22} - K_{12} K_{21}}{M_1 M_2} \end{aligned} \quad (13)$$

公式(13)也可以用于二阶虚拟同步机系统中。

$$\begin{aligned} f(\lambda) = & \lambda^4 + \frac{D_{11} M_{l2} + D_{l2} M_{11}}{M_{11} M_{l2}} \lambda^3 + \\ & \frac{K_{11} M_{l2} + K_{22} M_{11} + D_{11} D_{l2}}{M_{11} M_{l2}} \lambda^2 + \\ & \frac{K_{11} D_{l2} + K_{22} D_{11}}{M_{11} M_{l2}} \lambda + \frac{K_{11} K_{22} - K_{12} K_{21}}{M_{11} M_{l2}} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: M_{li} 为虚拟惯性时间常数; D_{li} 为虚拟阻尼。

可以看出, 等值两机系统的特征方程的解与发电机惯性时间常数、发电机阻尼系数和同步力矩系数有关, 而同步力矩系数主要与系统网架结构和发电机参数有关, 当发电机阻尼系数一定时, 特征方程的解由发电机惯量所决定。

2 小干扰稳定约束下电力系统惯量域构建

2.1 惯量域定量解析

对于电力系统低频振荡问题, 不论是电网实际运行要求, 还是阻尼控制器的设计要求, 总希望系统保持一定的阻尼水平, 以传统小扰动稳定域为边界设计的控制器在某些运行条件下不能保证足够的阻尼。因此, 为达到防范低频振荡对阻尼水平的要求, 依据临界阻尼比的概念定义一种新的工程实用小扰动稳定惯量域, 使得位于区域间振荡小干扰稳定约束下的电力系统惯量域内的稳定运行点符合抑制低频振荡的阻尼要求。

式(13)可以改写为

$$f(\lambda) = \lambda(\lambda^3 + \frac{D_1 M_2 + D_2 M_1}{M_1 M_2} \lambda^2 + \frac{K_{11} M_2 + K_{22} M_1}{M_1 M_2} \lambda + \frac{D_1 D_2}{M_1 M_2} \lambda + \frac{K_{11} D_2 + K_{22} D_1}{M_1 M_2}) \quad (15)$$

两机系统的特征方程的解有一个零根, 一个实根, 一对共轭复根。本文关注的是区域间振荡模式, 即关注特征方程求解出的共轭复根, 记为

$$\lambda_{1,2} = \sigma \pm j\omega \quad (16)$$

从式(15)中提取出三次特征多项式:

$$\lambda^3 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3 \quad (17)$$

其中,

$$\begin{cases} a_1 = \frac{D_1 M_2 + D_2 M_1}{M_1 M_2} \\ a_2 = \frac{K_{11} M_2 + K_{22} M_1 + D_1 D_2}{M_1 M_2} \\ a_3 = \frac{K_{11} D_2 + K_{22} D_1}{M_1 M_2} \end{cases} \quad (18)$$

令 $x = \lambda - \frac{a_1}{3}$, 则式(17)可变为

$$x^3 + px + q = 0 \quad (19)$$

式中: $p = a_2 - \frac{a_1^2}{3}$; $q = \frac{2a_1^3}{27} - \frac{a_1 a_2}{3} + a_3$ 。

用卡丹公式^[29]求解其共轭复根为

$$x_1 = \omega \cdot \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \omega^2 \cdot \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} \quad (20)$$

$$x_2 = \omega^2 \cdot \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \omega \cdot \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} \quad (21)$$

式中, $\omega = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i$ 。

由式(20)和式(21)可以得到特征值实、虚部的表达式分别为

$$\sigma = -\frac{a_1}{3} - \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} \right) \quad (22)$$

$$\omega = \frac{\sqrt{3}}{2}i \cdot \left(\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} \right) \quad (23)$$

最终得出阻尼比^[30]的计算公式为

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (24)$$

从式(24)可以看出, 区间振荡模式阻尼比与两区域惯性时间常数 M_1 、 M_2 的分布有关, 同时受两区域阻尼系数 D_1 、 D_2 和同步力矩系数 K_{11} 、 K_{22} 的影响, 借此本文可以对区域间振荡小干扰稳定约束下的电力系统惯量域进行定量分析。

为防止发生低频振荡, 一般要求低频振荡模式具有一定的阻尼比, 《电力系统安全稳定计算技术规范》^[31]也给出相关规定: 正常方式下, 区域振荡模式以及与主要大电厂、大机组强相关的振荡模式的阻尼比宜达到0.03以上; 故障后的特殊运行方式下, 阻尼比至少达到0.01~0.02。因此一般取临界阻尼比 $\zeta_{\text{crit}} = 0.05$ 作为低频振荡区域间模式惯量域的边界, 并将其定义为电力系统小干扰稳定约束下的惯量域, 简称为小扰动惯量域。

2.2 惯量分布对于区域间振荡模式阻尼比影响解析

在两区域系统中, 不仅应考虑单台机组惯量变化对于系统区域间振荡模式的影响, 更应该考虑整个系统中两区域间惯量分布特征的影响。本文借用四机两区域系统模型, 如图2所示, 分别在两区域惯量相等、送端惯量为受端的二倍和受端惯量为送端的二倍这三种工况下, 探究惯量分布对于区域间振荡模式阻尼比的影响。

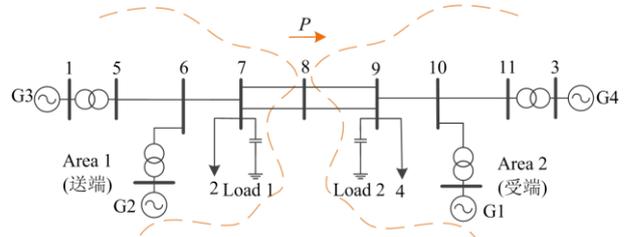


图2 四机两区域模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of four-generator two-area model

初始状态下, 两区域惯量基本相等(送端惯性时间常数 $M_1=26$ s, 受端惯性时间常数 $M_2=24.7$ s), 分别降低送受端两个区域的惯量, 观察其区域间振荡模式阻尼比随惯量变化的情况如图3所示。

在两端惯量基本相等的情况下, 改变任一端的惯量都会使送受端惯量比值增大, 而由图3可知, 任一端惯量降低都会导致阻尼比增大, 这说明送受端惯量比值越大区域间振荡模式的阻尼比越大, 小干扰稳定性越好。

继而将送端惯量减小一半, 此时受端惯量约为

送端惯量的二倍(送端惯性时间常数 $M_1=13$ s, 受端惯性时间常数 $M_2=26$ s), 分别降低送受端两个区域的惯量, 区域间振荡模式阻尼比随惯量变化的情况如图 4 所示。

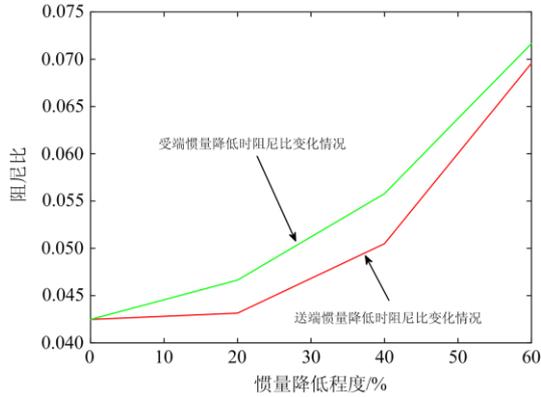


图 3 两区域惯量近似相等时区域间振荡模式阻尼比与惯量关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the relationship between the damping ratio and inertia of the inter-area oscillation mode when the inertia of the two regions are approximately equal

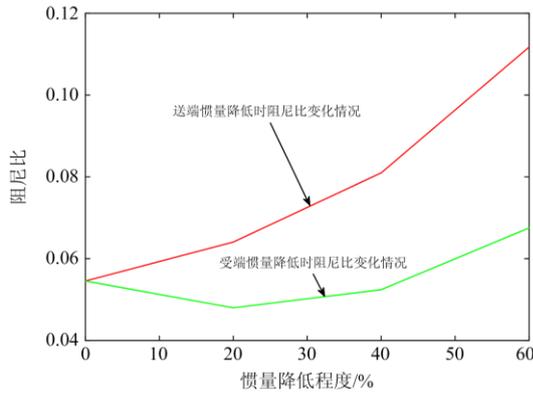


图 4 受端惯量为送端二倍时区域间振荡模式阻尼比与惯量关系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the relationship between damping ratio and inertia of the inter-regional oscillation mode when the receiving end inertia is twice the sending end

由图 4 可知, 区域间振荡模式阻尼比随送端惯量降低而一直增大, 随受端惯量降低先减小后增大, 且约在两端惯量相等时取得最小值, 即送受端惯量比值越大区域间振荡模式的阻尼比越大, 小干扰稳定性越好。

最后研究送端惯量为受端惯量的二倍时的情况(送端惯性时间常数 $M_1=26$ s, 受端惯性时间常数 $M_2=13$ s), 分别降低送受端两个区域的惯量, 区域间振荡模式阻尼比随惯量变化的情况如图 5 所示。

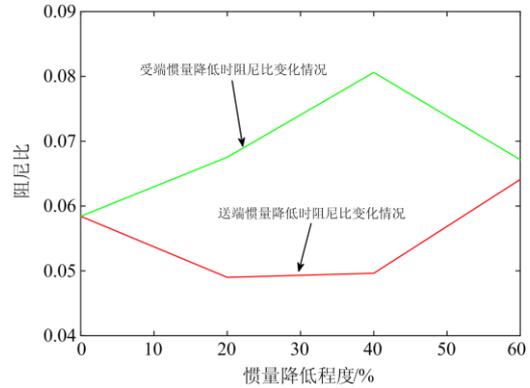


图 5 送端惯量为受端二倍时区域间振荡模式阻尼比与惯量关系示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the relationship between the damping ratio of the inter-area oscillation mode and the inertia when the inertia of the sending end is twice the receiving end

在送端惯量为受端二倍的情况下, 区域间振荡模式阻尼比随送端惯量降低先减小后增大, 随受端惯量降低而增大, 同样是送受端惯量比值越大区域间振荡模式阻尼比越大, 系统稳定性越好。但是受端惯量降低 60% 左右时出现阻尼比减小的情况, 对其模态信息进行分析后发现其受端发电机在振荡模式中的参与度已经降到很低, 振荡频率和阻尼比升高, 已经近似于送端的本地振荡模式, 因而此特例不属于本文所研究的区域间振荡模式范畴, 故不作详细展开讨论。

3 算例分析

3.1 四机系统算例分析及稳定域构建

本文采用四机系统和十机系统来讨论文中所给惯量域的边界构成及其分布特性。在算例中统一取 $\zeta_{\text{cri}}=0.05$, 实际应用时, 只需根据实际情况确定合适的 ζ_{cri} 取值, 即可采用上述算法实现对小扰动惯量域的求解。将四机系统经部分惯量中心等值为两机系统进行研究, 如图 6 所示, 文中采用的四机系统参数见文献[17]。

在区域间联络线 7-9 处设置三相短路故障, 原四机系统的状态矩阵为 8×8 的矩阵 \mathbf{A} , 对该系统进行特征值分析, 发现该系统包含两个本地振荡模式一个区间振荡模式, 本文针对区域间振荡模式分析, 其振型为 G1、G4 和 G2、G3 发生振荡, 据此将四机系统划分为送受端两个区域, 其中 G1、G4 为受端, G2、G3 为送端, 将线路 7-9 作为区域间联络线。

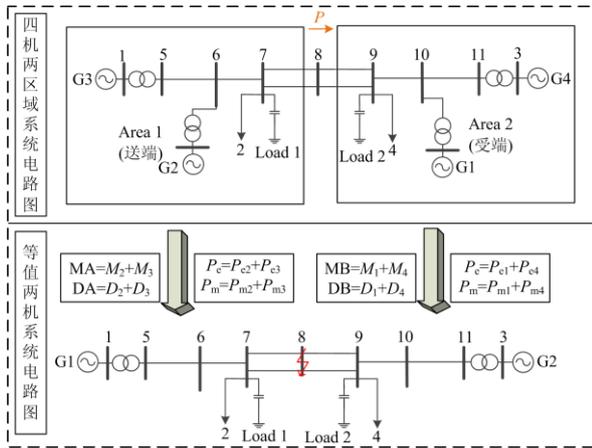


图 6 四机系统等值过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the equivalence process of the four-generator system

区域间振荡模式的阻尼比与两个区域的等值惯量有关，将四机系统等值为两机系统后，得到一个新的 4×4 的状态矩阵 A' ，状态矩阵 A 与 A' 的特征值分析结果如表 1 所示。三种计算方式下的区间模式阻尼比结果相差不大，验证了部分惯量中心等值方法和等值两机系统区域间振荡模式阻尼比计算公式的有效性。

表 1 三种计算方式结果比对

Table 1 Comparison of results of three calculation methods

结果类型	区间模式特征值	区间模式阻尼比
四机系统	$-0.132\ 96 \pm 3.127\ 3j$	0.042 477 534
等值两机系统	$-0.138\ 34 \pm 3.101\ 3j$	0.044 562 787
本文所提计算方法	$-0.138\ 3 \pm 3.102\ 5j$	0.044 532 730

设置等值两机系统中两台发电机的阻尼系数为 $D_1=D_2=7$ ，在保证阻尼系数和其他模型参数不变的情况下，分别改变两台发电机的惯性时间常数 M_1 和 M_2 ，惯量的取值范围为 $0 \sim 100$ s。观察其阻尼比的变化情况，并取出其满足大于临界阻尼比 $\zeta_{cri} = 0.05$ 的所有惯量点，从而构成区域间振荡小干扰稳定约束下的电力系统惯量域如图 7 所示。

图 7 中彩色区域即为满足区域间振荡模式临界阻尼比的等值两机系统的惯量域，可以看出小扰动惯量域呈现出两侧积聚而中间空白的‘L’型趋势，同时该惯量域中图像颜色的深浅代表着阻尼比数值的大小，惯量域边界处为数值最小的深蓝色，而坐标轴处为数值最大的黄色区域。

当两区域惯量相差不大时阻尼比的点落在中间的空白区域，而当两区域惯量比值越大则越靠近两坐标轴侧的黄色区域，这意味着对于区域间振荡模式来说，两侧发电机的惯量比值越大越有利于小

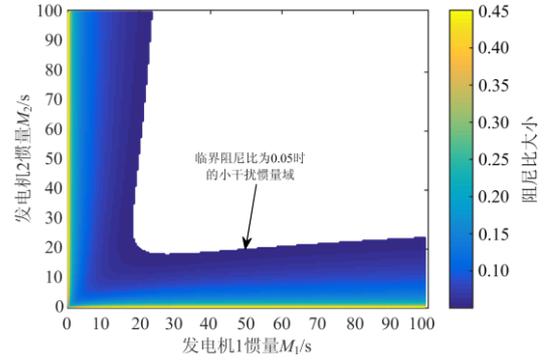


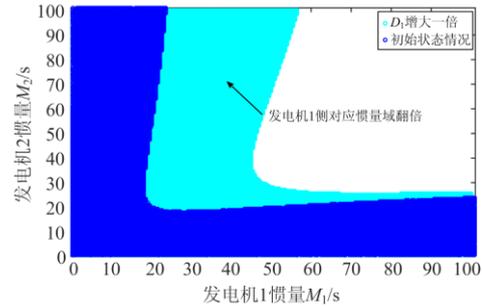
图 7 四机系统区域间振荡模式小干扰惯量域示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the small signal inertia region of the inter-area oscillation mode of the four-generator system

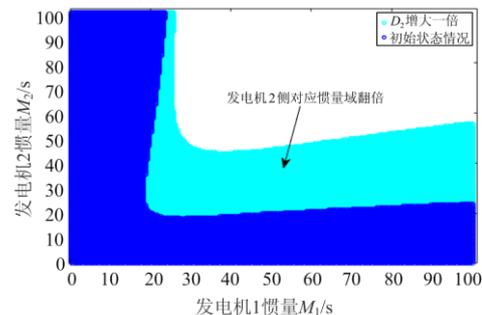
干扰稳定。

由阻尼比公式可知，电力系统小扰动惯量域受两侧发电机的阻尼系数和同步力矩系数的影响，接下来对这两个影响因素进行分析：

首先，在 $D_1=D_2=7$ 的初始运行状态下，保证同步力矩系数和其他模型参数不变，分别将 D_1 、 D_2 增大一倍，再分别改变两台发电机的惯性时间常数 M_1 和 M_2 ，惯性时间常数的取值范围为 $0 \sim 100$ s，观察其阻尼比的变化情况，并取出其满足大于临界阻尼比 $\zeta_{cri} = 0.05$ 的所有惯量点，从而得到惯量域对比结果如图 8 所示。



(a) D_1 增大一倍惯量域变化情况



(b) D_2 增大一倍惯量域变化情况

图 8 发电机阻尼系数对于小扰动惯量域影响效果示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the effect of generator damping coefficient on small signal inertia region

由图 8 可知, 发电机阻尼系数与四机系统小扰动惯量域呈正比例关系, 当一侧发电机的阻尼系数增大一倍时, 该发电机侧对应的惯量域也相应增大一倍左右。

其次, 在 $K_{11}=0.397\ 67$ 、 $K_{22}=0.379\ 6$ 的同一初始运行状态下, 保证发电机阻尼系数和其他模型参数不变, 分别将 K_{11} 、 K_{22} 增大一倍, 再分别改变两台发电机的惯性时间常数 M_1 和 M_2 , 惯性时间常数的取值范围为 0~100 s, 观察其阻尼比的变化情况, 并取出其满足大于临界阻尼比 $\zeta_{cri}=0.05$ 的所有惯量点, 从而得到惯量域对比结果如图 9 所示。

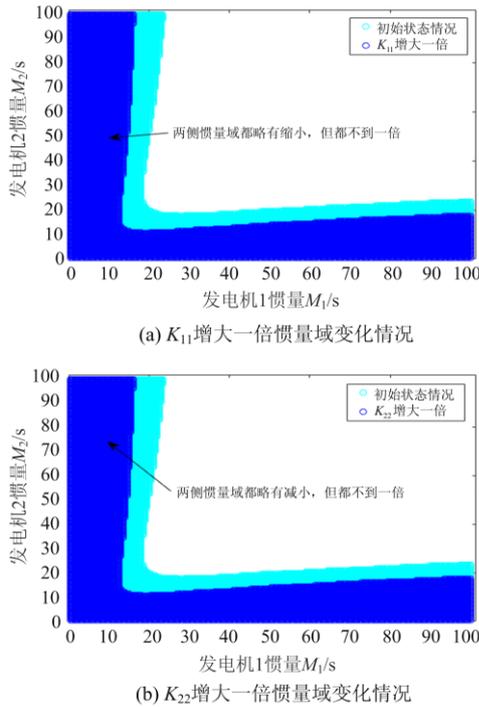


图 9 发电机同步力矩系数对小扰动惯量域影响效果图
Fig. 9 Effect diagram of the effect of generator synchronous torque coefficient on small signal inertia region

由图 9 可知, 同步力矩系数与四机系统小扰动惯量域呈反比关系, 当一侧发电机的相对同步力矩系数增大一倍时, 整体惯量域会相应减小, 因而可以得出结论, 增大发电机的阻尼系数或者减小发电机同步力矩系数都可以使区域间振荡小干扰稳定约束下的电力系统惯量域增大。

此外, 惯量域还可以应用于新能源场景下, 针对新能源接入的情况, 本文探究了风机接入对于小扰动稳定惯量域的影响, 分别取惯量域的边界点(21, 67)、(66, 21)域内点(11, 62)、(72, 7)和域外点(30, 80)、(70, 40)进行验证, 比较永磁风机接入不同侧时区域间振荡模式阻尼比与同步机惯量数值降低相同比例

时区域间振荡模式阻尼比变化情况如表 2 所示。

表 2 两种场景下不同坐标点阻尼比对比数据
Table 2 Comparison data of damping ratio of different coordinate points in two scenarios

取点类型	本文计算方法	同步机减惯量	风机替受端效果	风机替送端效果
边界点 1	0.050 5	0.050 490	0.050 748	0.050 518
边界点 2	0.050 2	0.050 255	0.050 727	0.050 105
域内点 1	0.076 9	0.076 954	0.077 970	0.076 516
域内点 2	0.105 9	0.105 986	0.105 266	0.107 131
域外点 1	0.041 0	0.040 996	0.041 126	0.041 079
域外点 2	0.033 6	0.033 654	0.034 078	0.033 474

由表 2 可知, 永磁风机接入后惯量降低对于惯量域的影响效果与同步机惯量降低的效果基本一致, 且风机替送端的效果要略好一些, 初步验证了本文所提小扰动稳定惯量域在新能源场景下的可行性。

3.2 十机系统算例分析及稳定域构建

十机系统经部分惯量中心等值成两机系统过程如图 10 所示, 文中采用的十机系统参数取自文献 [32]。在母线 1 处设置三相短路故障, 原十机系统的状态矩阵为 20×20 的矩阵 A , 对该系统进行特征值分析, 发现该系统包含 9 个机电振荡模式, 针对振荡频率最低、阻尼比最小的两个区域间振荡模式进行分析, 区间振荡模式一的振型为 G1 和 G2-G10 发生振荡, 据此将十机系统分为送受端两个区域, 其中 G2-G10 为送端区域, G1 为受端区域。以线路

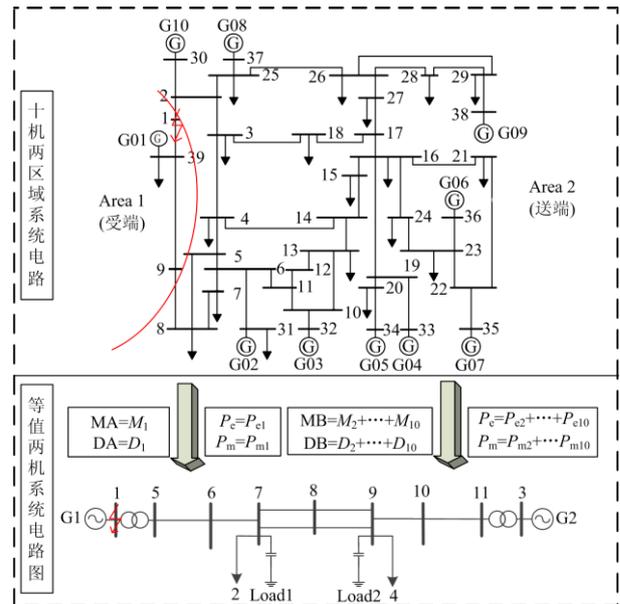


图 10 十机系统等值为两机系统过程示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the process of 10-generator system equivalent to two-generator system

2-1 和线路 8-9 为区域间联络线，等值为两机系统后，得到一个新的 4×4 的状态矩阵 A' 。

状态矩阵 A 与 A' 的特征值对比结果如表 3 所示，区域间振荡模式的阻尼比与十机系统特征值分析的结果同样相差不大，证明了部分惯量中心等值方法的有效性。

表 3 三种计算方式下典型区域间振荡模式特征值分析结果

Table 3 Eigenvalue analysis results of typical inter-area oscillation modes under three calculation methods

类型	特征值 实部	特征值 虚部	相关机组	阻尼比
十机系统	-0.244 96	4.487 15j	G1/G2-G10	0.054 50
两机等值系统	-0.25 000	4.284 80j	G1/G2-G10	0.058 25
本文计算方法	-0.25 000	4.287 00j	G1/G2-G10	0.058 20

设置等值两机系统两台发电机的阻尼系数分别为 $D_1=500$ 和 $D_2=282.7$ ，在保证阻尼系数和其他模型参数不变的情况下，分别改变两台发电机的惯性时间常数 M_1 和 M_2 ，惯性时间常数的取值范围为 0~6 000 s，观察其阻尼比的变化情况，并取出其满足大于临界阻尼比 $\zeta_{cri}=0.05$ 的惯量点，从而构成区域间振荡小干扰稳定约束下的电力系统惯量域，如图 11 所示。

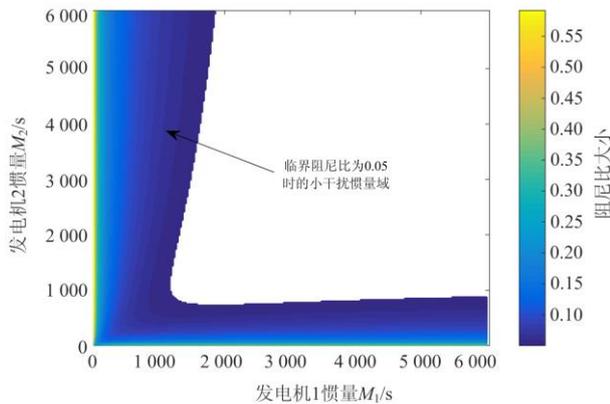


图 11 十机系统区域间振荡模式小扰动惯量域示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the small signal inertia region of the inter-area oscillation mode of ten-generator system

从图 11 可以看出，同四机等值系统的惯量域一样，小扰动稳定惯量域呈现出两侧积聚而中间空白的‘L’型趋势，根据图像颜色来判断，当两区域惯量相差越大则越靠近两坐标轴侧的黄色区域，即两侧发电机的惯量比值越大越有利于小干扰稳定。

在四机系统和十机系统算例中区域间振荡模式小扰动惯量域的分布趋势大体上是一致的，这说明本文提出的小扰动惯量域的构建方法具有普适性，同时也对前面分析的惯量分布影响规律的有效

性进行了进一步的验证。

再对两侧发电机的阻尼系数和相对同步力矩系数这两个影响因素进行分析，首先，在 $D_1=500$ 、 $D_2=282.7$ 的初始运行状态下，保证同步力矩系数和其他模型参数不变，分别将 D_1 、 D_2 增大一倍，再分别改变两台发电机的惯性时间常数 M_1 和 M_2 ，惯性时间常数的取值范围为 0~6 000 s，观察其阻尼比的变化情况，从而得到小扰动惯量域对比结果如图 12 所示。

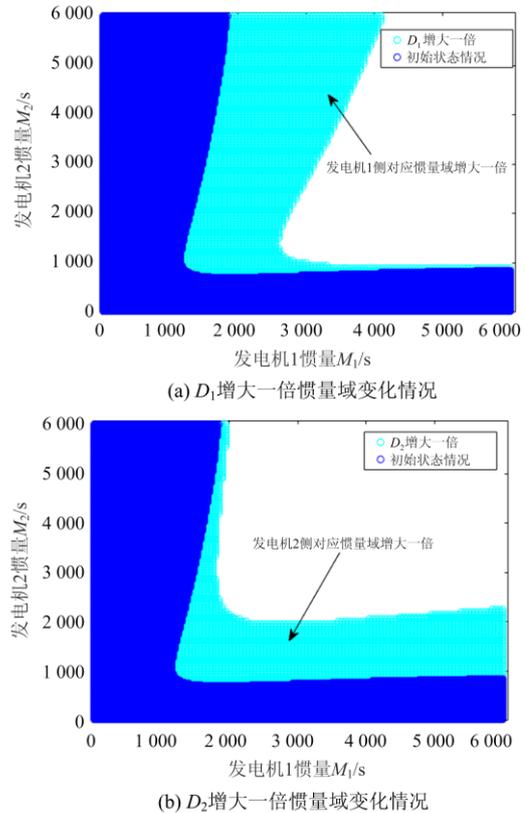


图 12 发电机阻尼系数对于小干扰惯量域影响效果示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the effect of generator damping coefficient on the small signal inertia region

由图 12 可知，阻尼系数与十机系统小扰动惯量域也呈正比关系，当一侧发电机的阻尼系数增大一倍时，该发电机侧对应的惯量域也相应增大一倍左右。

其次，在同一初始运行状态下，保证发电机阻尼系数和其他模型参数不变，分别将 K_{11} 、 K_{22} 增大一倍，再分别改变两台发电机的惯性时间常数 M_1 和 M_2 ，取值范围为 0~6 000 s，观察其阻尼比的变化情况，小扰动惯量域对比结果如图 13 所示。

由图 13 可以看出，同步力矩系数与十机系统惯量域呈反比关系，当一侧发电机的相对同步力矩

系数增大一倍时, 整体惯量域会相应减小, 增大发电机阻尼系数和减小发电机同步力矩系数都会使区域间振荡小干扰稳定约束下的电力系统惯量域增大。

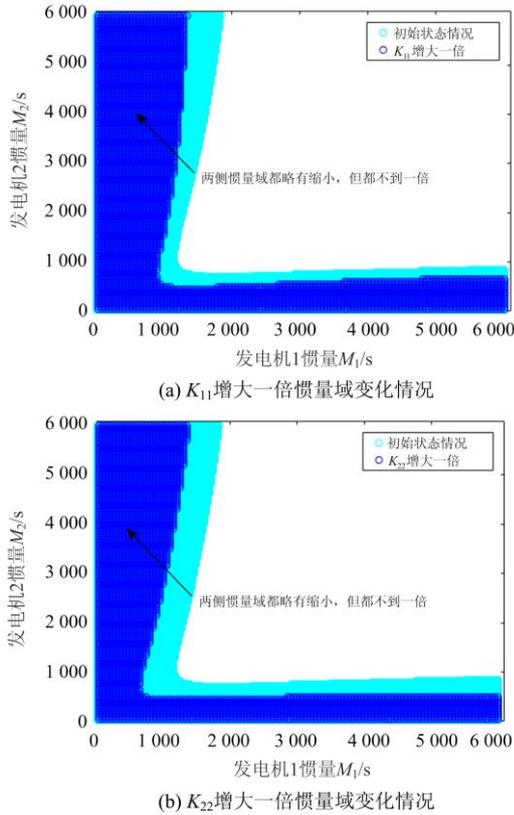


图 13 发电机同步力矩系数对于小扰动惯量域影响效果示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the effect of the generator synchronous torque coefficient on the small signal inertia region

对另一个区域间振荡模式进行分析, 其振型为 G9 和 G1-G8、G10 发生振荡, 据此将十机系统分为送受端两个区域, 其中 G1-G8、G10 为受端区域, G9 为送端区域。以线路 26-29 和线路 28-29 为区域间联络线, 等值为两机系统后, 得到一个新的 4×4 的状态矩阵 A' 。

状态矩阵 A 与 A' 的特征值对比结果如表 4 所示, 该区域间振荡模式的阻尼比与十机系统特征值分析的结果同样相差不大, 证明了基于部分惯量中心的等值方法对于任意区域间振荡模式都是适用的。

设置等值两机系统两台发电机的阻尼系数分别为 $D_1=34.5$ 和 $D_2=748.2$, 在保证阻尼系数和其他模型参数不变的情况下, 分别改变两台发电机的惯量, 观察其阻尼比的变化情况, 并取出其满足大于临界阻尼比 $\zeta_{cri} = 0.03$ 的惯量点, 从而构成区域间振

荡模式二的电力系统小扰动惯量域, 如图 14 所示。

表 4 三种计算方式下非典型区域间振荡模式特征值分析结果

Table 4 Eigenvalue analysis results of the a typical inter-area oscillation modes under three calculation methods

类型	特征值 实部	特征值 虚部	相关机组	阻尼比
十机系统	-0.250 0	j6.134 3	G9/G1-G8、G10	0.040 72
两机等值系统	-0.250 0	j6.128 0	G9/G1-G8、G10	0.040 76
本文计算方法	-0.250 0	j6.127 2	G9/G1-G8、G10	0.040 77

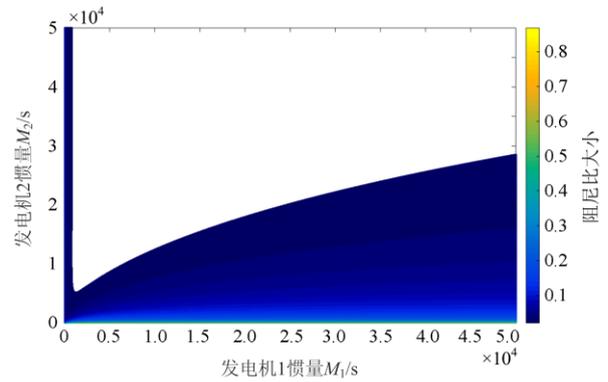


图 14 十机系统区域间振荡模式二小扰动惯量域示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the small signal inertia region of another inter-area oscillation mode of the ten-generator system

由图 14 可知, 本文所提惯量域构建方法同样适用于非典型区域间振荡模式, 其特性也同样满足“L”型趋势, 但是由于送受端两侧机群惯量的变化, 惯量域范围也会有所变化。

同样, 针对新能源接入的情况, 探究风机接入对于十机系统小扰动惯量域的影响, 分别取惯量域的边界点(1475, 3000)、(3700, 775), 域内点(225, 3100)、(5100, 300)和域外点(2000, 4000)、(4000, 2000)进行验证。比较永磁风机接入不同侧时区域间振荡模式一阻尼比与同步机惯量数值降低相同比例时区域间振荡模式阻尼比如表 5 所示。

表 5 两种场景下不同坐标点阻尼比对比数据

Table 5 Comparison data of damping ratio of different coordinate points in two scenarios

取点 类型	本文计 算方法	同步机 减惯量	风机替送端 效果	风机替受端 效果
边界点 1	0.050 0	0.050 027	0.050 984 00	0.049 559 3
边界点 2	0.050 4	0.050 380	0.052 707 00	0.051 130 9
域内点 1	0.180 9	0.180 987	0.203 041 00	0.180 719 7
域内点 2	0.093 4	0.093 440	0.094 282 00	0.093 910 5
域外点 1	0.042 8	0.042 791	0.043 553 90	0.042 315 5
域外点 2	0.030 4	0.030 377	0.031 615 18	0.030 480 2

永磁风机接入后惯量降低对于惯量域的影响效果与同步机惯量降低的效果基本一致,初步验证了本文所提区域间振荡小干扰稳定约束下的电力系统惯量域在新能源场景下的有效性。

4 结论

本文分析了区域互联系统惯量分布与小干扰稳定性之间的联系,定义了计及小干扰稳定约束的电力系统惯量域,通过四机两区域系统和十机系统等值模型对其进行分析、验证,相关结论如下:

1) 对于两机系统的区域间振荡模式而言,送受端发电机惯量比值越大,区域间振荡模式的阻尼比越大,小干扰稳定性越好。

2) 构建了基于区域间振荡模式的电力系统小扰动惯量域,量化了两区域惯量与区域间振荡模式阻尼比的关系。通过仿真验证该惯量域是有效的,可以为现场调度人员提供理论支持,同时也可指导新能源接入条件下惯量变化对于系统小干扰稳定性的影响。

3) 小扰动惯量域呈现出两侧聚集而中间空白的‘L’型趋势,两侧发电机的惯量比值越大越有利于小干扰稳定。发电机阻尼系数与小干扰惯量域成正比关系,发电机同步力矩系数与小干扰惯量域成反比关系。

后续研究工作中,将在新能源系统中验证本文所提惯量域构建方法的有效性,并将进一步研究各个区域内惯量分布对于区域间振荡模式的影响,为各区域内惯量优化配置提供依据。

参考文献

- [1] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [2] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望—试论三代电网[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1-11, 22.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of three-generation power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 1-11, 22.
- [3] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395.
- [4] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175.
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [5] 寇凌峰, 张颖, 季宇, 等. 分布式储能的典型应用场景及运营模式分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 177-187.
KOU Lingfeng, ZHANG Ying, JI Yu, et al. Analysis of typical application scenarios and operation modes of distributed energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 177-187.
- [6] National Grid ESO. The technical report to the event of 9 August 2019[EB/OL]. [2020-03-04]. <https://www.Nationalgrideso.com/document/152346/download>.
- [7] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-6.
ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of “9·28” blackout in South Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6.
- [8] GU Huajie, YAN Renfeng, SAHA T K. Minimum synchronous inertia requirement of renewable power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1533-1543.
- [9] ULBIG A, BORSCHKE T S, ANDERSSON G. Impact of low rotational inertia on power system stability and operation[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3): 7290-7297.
- [10] 蒋文韬, 付立军, 王刚, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制对系统小扰动性影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 33-40.
JIANG Wentao, FU Lijun, WANG Gang, et al. Impact of direct-drive permanent magnet wind turbines virtual inertia control on power system small signal stability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 33-40.
- [11] CHAK S, BHOWMIK P, ROUT P K. Load shedding strategy coordinated with storage device and D-STATCOM to enhance the microgrid stability[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 250-268. DOI: 10.1186/s41601-019-0138-0.
- [12] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-27.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27.
- [13] TIELENS P, VAN H D. The relevance of inertia in power systems[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 999-1009.
- [14] ERVIN S, DEEPAK V, GUNTHER B, et al. Impact of reduced system inertia on stable power system operation and an overview of possible solutions[C] // 2016 IEEE

- Power and Energy Society General Meeting (PESGM), July 17-21, 2016, Boston, MA, USA.
- [15] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3007.
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3007.
- [16] 刘铨, 杨慧, 王旭, 等. 基于支路模式势能的含高比例DFIG 电网低频振荡特性分析[J]. 东北电力大学学报, 2020, 40(3): 41-49.
LIU Cheng, YANG Hui, WANG Xu, et al. Low frequency oscillation characteristics analysis with high penetration of DFIG using line modal potential energy[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2020, 40(3): 41-49.
- [17] 何大愚. 对美国西部系统 1996 年两次大事故的后续认识(分层分析)[J]. 中国电力, 1998, 31(5): 3-5.
HE Dayu. The successive ponderation(layers-built analysis) over U.S.W SCC two outages in 1996[J]. Electric Power, 1998, 31(5): 3-5.
- [18] KUNDER P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [19] 潘学萍. 惯量对区域振荡模式的影响[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(10): 49-51.
PAN Xueping. Influence of generator inertia on interarea oscillation mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(10): 49-51.
- [20] BORSCHKE T S, LIU T, HILL D J. Effects of rotational inertia on power system damping and frequency transients[C] // 2015 54th IEEE Conference on Decision and Control, December 15-18, 2015, Osaka, Japan: 5940-5946.
- [21] PAGNIER L, JACQUOD P. Optimal placement of inertia and primary control: a matrix perturbation theory approach[J]. IEEE Access, 2019, 7: 145889-145900.
- [22] 黄俊凯, 杨知方, 刘珏麟, 等. 面向小干扰稳定提升的虚拟惯量优化分配模型与方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 713-723.
HUANG Junkai, YANG Zhifang, LIU Juelin, et al. Optimal allocation of virtual inertia for improving small-signal stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 713-723.
- [23] 代林旺, 李少林, 秦世耀, 等. 含阻尼环节的电流源型风电虚拟同步发电机控制与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 20-27.
DAI Linwang, LI Shaolin, QIN Shiyao, et al. Control and analysis of current-source wind turbine virtual synchronous generator with damping coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 20-27.
- [24] 黄林彬, 辛焕海, 黄伟, 等. 含虚拟惯量的电力系统频率响应特性定量分析方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 31-38.
HUANG Linbin, XIN Huanhai, HUANG Wei, et al. Quantified analysis method of frequency response characteristics for power systems with virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 31-38.
- [25] 刘青, 徐宏璐, 李权. 基于 STATCOM/BESS 强化风机 VSG 虚拟惯性的协同控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 74-81.
LIU Qing, XU Honglu, LI Quan. Cooperative control strategy of wind turbine-VSG with enhanced virtual inertia based on STATCOM/BESS[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 74-81.
- [26] 赵书强, 常鲜戎, 贺仁睦, 等. 基于等值二机模型的多机 PSS 极点配置[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(22): 3-5.
ZHAO Shuqiang, CHANG Xianrong, HE Renmu, et al. Pole disposition of power system stabilizers in multi-machine power system based on equivalent two-machine model[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(22): 3-5.
- [27] 赵书强, 常鲜戎, 潘云江, 等. 基于部分惯量中心等值的多机系统特征根计算[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(9): 3-5.
ZHAO Shuqiang, CHANG Xianrong, PAN Yunjiang, et al. A partial center of inertia transformation based method for calculating eigenvalues of multi-machine power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(9): 3-5.
- [28] 王卿文. 求特征多项式的 Leverrier 方法[J]. 潍坊教育学院学报, 1990(2): 64-68.
WANG Qingwen. Leverrier method for finding characteristic polynomials[J]. Journal of Weifang Education College, 1990(2): 64-68.
- [29] 田红亮. 一元三次方程根的解法[J]. 湖北工程学院学报, 2019, 39(6): 97-105.
TIAN Hongliang. Extracting roots of one variable cubic equation[J]. Journal of Hubei Institute of Technology, 2019, 39(6): 97-105.
- [30] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [31] 中华人民共和国能源局. 电力系统安全稳定计算技术规范: DL/T 1234—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [32] LEZAMA G, RAMON F. Prediction and control of transient instability using wide area phasor measurements[D]. Manitoba: University of Manitoba, 2011.

收稿日期: 2020-12-10; 修回日期: 2021-02-27

作者简介:

刘 铨(1985—), 男, 副教授, 硕导, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: 05dylc@163.com

赵晓洋(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统小干扰稳定性分析。E-mail: zxyneepu@163.com

(编辑 魏小丽)