

机电扰动传播特性的电力系统边界划分 频率响应建模

李世春^{1,2}, 李卓霖^{1,2}, 石明达^{1,2}, 刘浩斌^{1,2}, 袁传州^{1,2}, 刘颂凯^{1,2}

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘要:随着我国电力工业的不断发展和新能源渗透率快速增加,在满足日常负荷需求的同时,电网规模逐渐扩大,导致构建完整的复杂电力系统的频率响应模型十分困难。针对复杂电网中参数过多导致难以建立系统等值频率响应模型问题,提出了基于机电扰动传播特征的系统边界划分方法。首先,在连续体模型中对机电扰动传播特征进行分析。其次,从机电扰动传播的临界频率阈值和发电机的响应时间出发,对受扰动影响的发电机的复合机电距离进行层次聚类,判断不同发电机之间的联系紧密程度,确定复杂电网的边界划分方法,简化系统频率响应分析的复杂性和计算规模。最后,建立系统频率响应聚合模型,以IEEE 10机39节点系统为算例,设置3种不同典型扰动,通过Matlab/Simulink仿真验证所提系统边界划分方法在不同扰动场景下的有效性和适应性。

关键词:机电扰动;动态等值;系统边界划分;层次聚类;参数聚合;系统频率响应

中图分类号:TM71 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26878

Frequency Response Modeling for Power System Boundary Division Considering Electromechanical Disturbance Propagation Characteristics

LI Shichun^{1,2}, LI Zhuolin^{1,2}, SHI Mingda^{1,2}, LIU Haobin^{1,2}, ZHONG Chuazhou^{1,2}, LIU Songkai^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002,

Hubei, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory of Cascade Hydropower Station Operation
and Control (Three Gorges University), Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: With the continuous development of China's power industry and the rapid increase in the penetration rate of new energy, while meeting the daily load demand, the scale of the power grid has gradually expanded, making it very difficult to construct a complete frequency response model of complex power systems. Aiming at the problem that the excessive parameters in complex power grids make it difficult to establish a system equivalent frequency response model, a system boundary division method based on the propagation characteristics of electromechanical disturbances was proposed. The propagation characteristics of electromechanical disturbances were analyzed in the continuum model. Starting from the critical frequency threshold of electromechanical disturbance propagation and the response time of generators, hierarchical clustering was performed on the composite electromechanical distances of generators affected by disturbances to determine the degree of close connection between different generators, and a boundary division method for complex power grids was determined to simplify the complexity and calculation scale of system frequency response (SPR) analysis. Finally, taking the IEEE 10-machine 39-bus system as a calculation example, three different typical disturbances were set in Matlab/Simulink simulations to verify the effectiveness and adaptability of the proposed system boundary division method under different disturbance scenarios.

Key words: electromechanical disturbance; dynamic equivalence; system boundary division; hierarchical clustering; parameter aggregation; system frequency response (SFR)

基金项目:国家自然科学基金(52407118)

作者简介:李世春(1984—),男,博士,副教授,主要研究方向为含新能源电力系统运行与控制,Email:lschunu_023@126.com

通讯作者:李卓霖(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统运行与控制,Email:727647729@qq.com

在“双碳”战略的持续推进下,风电、光伏等新能源正不断并入电网,新能源渗透率将显著提升^[1]。由于我国乃至全世界电力系统的网架结构和运行方式正发生着变化,包括源-网-荷的大规模快速增长、波动性新能源的大量接入等,电网的节点数剧增,网架结构变得愈加复杂,导致构建完整的复杂电力系统的频率响应模型困难^[2]。

当前,时域分析法可用于电力系统频率特性的快速评估,通过精细化数学模型(含发电单元、输电网络及电力电子装置)分析暂态过程,以检验仿真准确性^[3]。然而,研究表明,时域仿真在大规模电网中计算效率低下^[4-5],需更小时间步长,导致频率计算显著下降^[5]。系统频率响应(system frequency response, SFR)模型描述干扰后频率变化,已用于快速解析不平衡功率与频率关系^[6]。传统SFR模型虽采用降阶与结构简化以压缩运算规模^[7],但忽略了网络拓扑时变性和频率分布特性,工程适用性不足。

现有研究中,时域分析法依赖参数聚合与惯性等效^[8],但在广域互联电网中局限性凸显^[9]。文献[10]阐明传统参数聚合原理,却忽略机组间动态响应时空差异,尤其是机电扰动传播路径对频率分布的影响。针对此,学者在机电扰动传播方面开展大量研究:文献[11]通过连续体模型引入微元增量元件,分析波速及衰减;文献[12]基于弹性介质振动类比,建立多惯性扭转振动波动方程,拓展至连续体非线性方程,推导幅值增衰条件。连续体模型有效描述了大型电网波传播^[13],但其与实际离散系统存在差异。文献[14]结合拉普拉斯与Z变换,推导离散链扰动传播贝叶斯解,验证连续体与离散模型增衰规律一致^[15];离散度越高,扰动传播频率范围越窄^[16]。综上,机电扰动呈局部振荡,传播中随频率和空间衰减。结合其动态特性与SFR模型,可将频率分布纳入分析体系,为新型频率稳定评估提供新思路。

大型电力系统频率安全分析通常聚焦受扰区域,其余部分简化处理。通过区域划分法^[17],将发电机分组为少量区域,在保证精度前提下降低复杂度与计算量。目前,国际上基于机电强度耦合的参数划分^[18]、弱耦合动态分群^[19]及机电距离方法^[20]来降低暂态计算维数。但传统机电距离仅依据拓扑结构,忽略扰动空间分布及方向性^[21]。本文结合惯性和电抗提出无方向化复合机电距离,从扰动传播临界频率阈值及发电机响应时间

出发,采用连续体模型分析机电暂态(s级),对受扰发电机距离进行层次聚类,优于静态网络方法,强调传播特性,判断机组联系紧密度,实现边界划分,简化频率响应,分析复杂性与规模。

1 复杂电网边界划分参数计算

1.1 机电扰动传播的临界频率阈值计算

电力系统稳态运行时常受各类随机扰动影响,扰动使发电机转子角增量以机电波形式在系统内传播;机电扰动引发的功角偏差从扰动点向电网其他位置传播时,受传播距离与电网参数限制,传播速度远小于光速^[22]。

结合实际电力系统参数的非均匀分布特性与机电扰动传播特性,将广域分布的电力系统元件近似看做连续体,建立系统连续体模型。如图1所示,链式系统为推导连续体模型的简化假设,实际电网的复杂拓扑通过层次聚类算法处理,可确保方法的普适性^[23]。假设电力系统均匀,每条输电线路的单位长度阻抗 z 相同。由于实际系统中发电机的数量有限,因此两发电机节点之间长度为 Δx 的线路不可忽略,设输电线路中第 j 台发电机的转子运动方程为

$$\frac{d^2 \Delta \theta_j}{dt^2} = \frac{c_0^2}{\Delta x^2} (\Delta \theta_{j+1} - 2\Delta \theta_j + \Delta \theta_{j-1}) \quad (1)$$

其中

$$c_0 = U \sqrt{\Delta x / z M_j}$$

式中: $\Delta \theta_{j-1}, \Delta \theta_j, \Delta \theta_{j+1}$ 分别为母线 $j-1, j, j+1$ 的相角偏差; Δx 为两节点之间的长度; c_0 为均匀电力系统中机电扰动的传播速度; U 为电压幅值; z 为线路单位阻抗; M_j 为第 j 台发电机的惯性常数。

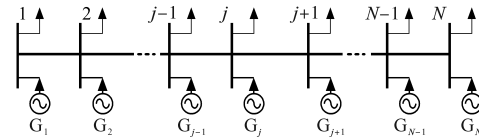


图1 链式系统

Fig.1 Chain system

若系统在节点1中发生单频机电扰动,电力系统中发电机 G_1 受机电波影响产生的转子相角增量 $\Delta \theta_1(t)$ 为

$$\Delta \theta_1(t) = A_1 e^{i \Delta \omega_1 t} \quad (2)$$

式中: A_1 为发电机 G_1 的相角增量振幅,反映扰动的初始强度; $\Delta \omega_1$ 为发电机转子角速度增量; i 为虚数单位。

机电扰动从扰动源节点1在链式系统中传播

时,其他发电机的转子角增量 $\Delta\theta_i(t)$ 具有相同的频率,但振幅 A_i 会发生改变,因此发电机 G_j 受机电扰动影响产生的转子角增量 $\Delta\theta_j(t)$ 为

$$\Delta\theta_j(t) = A_j e^{i\Delta\omega_r t} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)可得:

$$A_{j-1} + [2(\Delta\omega_r/\omega_c)^2 - 1]A_j + A_{j+1} = 0 \quad (4)$$

其中,转折频率 ω_c 为

$$\omega_c = 2c_0/\Delta x = 2U\sqrt{1/(z\Delta x M_j)} \quad (5)$$

为表征机电扰动幅值和相位的变化规律,引入波传递函数 $\gamma^{[24]}$ 。发电机 G_j 的相角增量振幅与波传递函数的关系为

$$A_j = \gamma_j A_1 \quad (6)$$

其中, γ_j 为波传递函数,表征扰动传播中的振幅衰减和相位变化,受电网拓扑、线路阻抗和发电机惯性等因素影响。

将式(6)代入式(4)求解得:

$$A_j = \begin{cases} A_1 e^{-2i\arcsin \frac{\Delta\omega_r}{\omega_c}} & \frac{\Delta\omega_r}{\omega_c} < 1 \\ \left[\frac{\Delta\omega_r}{\omega_c} + \sqrt{\left(\frac{\Delta\omega_r}{\omega_c}\right)^2 - 1} \right]^{-2j} A_1 e^{-inj} & \frac{\Delta\omega_r}{\omega_c} \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7),发电机 G_j 的相角增量幅值 A_j 的波形图如图2所示。

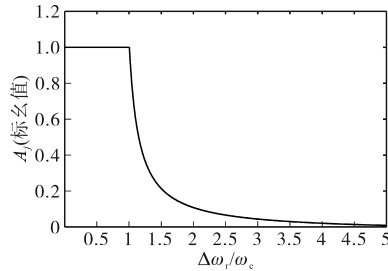


图2 机电扰动振幅波形图

Fig.2 Amplitude waveform diagram of electromechanical disturbance

由图2所示,在电力系统中,机电扰动只能在有限频率范围内传播,该频率范围阈值为转折频率 ω_c ,与发电机转动惯量和系统线路阻抗有关。当转子转速增量 $\Delta\omega_r$ 大于转折频率 ω_c 时,机电扰动沿传播方向的幅值会迅速衰减,当扰动频率超过临界频率阈值(转折频率)的3倍时,机电扰动的影响可忽略不计。因此,设定传播系数 $PC=\Delta\omega_r/\omega_c$, PC 越大,该节点发电机受机电扰动影响越小,当 $PC>3$ 时,发电机将不受机电扰动影响。

1.2 发电机转子功角变化时间计算

发电机受扰动后,在加速转矩作用下进入机

电暂态阶段。因各机组惯性常数与动态响应速率存在差异,暂态过程中发电机功角增量变化不同,这一差异导致机组间产生功率交换,使发电机无法恒加速/减速。若扰动持续时间较短,转子角变化不显著,此时可认为扰动后机组间无功功率交换,发电机转子以匀加速/减速运行。发电机 G_j 的转子功角增量 $\Delta\theta_j$ 为

$$\Delta\theta_j = \frac{1}{2} a_j t_j^2 = \frac{1}{2} \frac{P_j}{M_j} t_j^2 \quad (8)$$

式中: P_j 为发电机的有功功率输出。

计及误差的影响,设定修正系数 w ,由式(8)可得转子功角变化至 $\Delta\theta_j$ 所需的时间为

$$t_j = w\sqrt{2M_j/B_j} \quad (9)$$

式中: B_j 为转移电纳。

w 其取值基于系统运行条件下的统计分析结果,通常通过对典型扰动工况下的转子响应与理论模型的偏差进行最小二乘拟合来确定。通过选取多组扰动仿真数据,调整 w 使均方误差最小,从而保证模型在不同工况下的适应性。

以机电扰动在两节点之间的传播时间 t_j 为依据,构建复合机电距离 $^{[25]}$ 。该参数表示扰动发生后,发电机转子在恒定加速度运行下,转子功角变化 $\Delta\theta_j$ 所需的时间,即

$$\overline{ED}_i \triangleq w\sqrt{2M_i/B} \quad (10)$$

式中: $\overline{ED}_i$ 为复合机电距离, s ; B 为扰动源节点与受扰动发电机节点之间的转移电纳,反映电气联系强弱。

图1链式系统的发电机节点 i 上发生扰动时,扰动源点 i 与发电机节点 j 之间的复合机电距离根据式(10)可表示为

$$\overline{ED}_{ij} = w\sqrt{2M_j/B_{ji}} \quad (11)$$

式中: B_{ij} 为当扰动源点为 i 时,节点 i 与节点 j 之间的转移电纳。

同理,当发电机节点 j 上发生扰动时,扰动源点 j 与发电机节点 i 之间的复合机电距离为

$$\overline{ED}_{ji} = w\sqrt{2M_i/B_{ji}} \quad (12)$$

根据式(11)和式(12),在发电机节点 i 和发电机节点 j 之间,虽然转移导纳 B_{ij} 与 B_{ji} 相等,但在一般情况下两发电机的惯性并不相同,即 $M_i \neq M_j$,导致复合机电距离 $\overline{ED}_{ij}$ 与 $\overline{ED}_{ji}$ 也不相同,可见复合机电距离具有明显的方向性。在实际电网运行中,由于机电扰动传播路径具有不确定性,可

通过平均双向复合机电距离,消除因发电机惯性差异导致的方向性,确保层次聚类算法能够准确反映发电机间的相互影响,从而提高边界划分的精度,即构建无方向的复合机电距离量化指标 $\overline{ED}_{ij}^{av}$,则发电机节点 i (扰动源节点) 和 j 之间的机电距离平均值为

$$\begin{aligned}\overline{ED}_{ij}^{av} &= \overline{ED}_{ji}^{av} = \frac{1}{2} (\overline{ED}_{ij} + \overline{ED}_{ji}) \\ &= \frac{w}{2} (\sqrt{2M_i/B_{ij}} + \sqrt{2M_j/B_{ji}}) \quad (13)\end{aligned}$$

式中: $\overline{ED}_{ij}^{av}$ 为当扰动源点为 i 时,节点 i 与节点 j 之间的机电距离平均值; $\overline{ED}_{ji}^{av}$ 为当扰动源点为 j 时,节点 j 与节点 i 之间的机电距离平均值。

在相同机电扰动作用下,发电机的惯量 M_i 越大,机电扰动在传播时受到的阻碍越大,发电机加速度越小,转子功角转过 $\Delta\theta_j$ 所需的时间也就越长,导致转子功角变化所需的时间越长,发电机响应速度越慢。同理,在惯性常数相同时,若扰动源点和发电机节点之间的 B_{ij} 越大,发电机的转子加速度越大,转子功角转过 $\Delta\theta_j$ 所需的时间越短,发电机响应速度越快。基于此,可判断发电机是否有足够的响应速度参与调频。但过快的响应速度会导致系统稳定性下降。因此,需对各发电机的复合机电距离进行聚类来判断不同发电机之间的联系紧密程度,完成边界划分。

2 复杂电网边界划分方法

2.1 层次聚类优势

层次聚类是聚类算法的关键分支,核心原理为通过计算不同对象的相似性,构建树状层级结构。因其无需预设簇数、可处理复杂距离度量、能提供层次结构信息且具备灵活性与鲁棒性,在电力系统边界划分中表现突出。

K-means 聚类核心思路为:选取 K 个数据元素作为初始聚类质心,再按待聚类点与质心的距离判断相似性(距离越近相似度越高,越易归为一类),但其在电力系统边界划分中应用受限。首先需预设簇数 K ,电力系统中 K 值不当会使分组偏离系统实际动态特性(如 K 过小易错将不相关发电机归组, K 过大易分割相关发电机),影响后续等值建模与频率响应分析。

边界划分中,层次聚类按机电距离对发电机分组,确定受扰机组联系紧密程度并划分研究区域与外部区域;尤其在基于机电距离的机组分组

中,其更能适应系统动态特性,相比 K-means 更适合同本论文场景。

2.2 边界划分方法步骤

根据 1.1 节中的转折频率和传播系数,可筛选出受扰动影响的发电机节点。然后,通过对 1.2 节中受扰动影响的发电机复合机电距离进行层次聚类,判断不同发电机之间的联系紧密程度,进而将系统划分为研究区域和外部区域,完成边界划分。边界划分具体步骤如下:

1) 在正常运行的电力系统中,设置扰动点,计算扰动源点与发电机节点 i 之间的转折频率 ω_{ci} 和传播系数 PC 。根据传播系数 PC 确定各发电机是否受机电扰动影响,筛选出受机电扰动影响的发电机。

2) 若受扰动影响的发电机有 m 个,计算扰动源点与各受扰动影响的发电机节点之间复合机电距离 $\overline{ED}^{av}$,构造该系统的机电距离矩阵 M_s :

$$M_s = \begin{bmatrix} \overline{ED}_{1,1}^{av} & \cdots & \overline{ED}_{1j}^{av} & \cdots & \overline{ED}_{1,m}^{av} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \overline{ED}_{i,1}^{av} & \cdots & \overline{ED}_{ij}^{av} & \cdots & \overline{ED}_{i,m}^{av} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \overline{ED}_{m,1}^{av} & \cdots & \overline{ED}_{mj}^{av} & \cdots & \overline{ED}_{m,m}^{av} \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据机电距离矩阵,计算可靠度矩阵 R 和有效度矩阵 A ,并对两矩阵进行迭代更新。在数据聚类过程中,有效度表征样本数据对该类簇的隶属程度,可靠度则表征样本数据成为聚类中心的可能性。若样本的可靠度和有效度综合评价升高,其成为聚类中心的可能性也随之提高。第 n 次迭代时,可靠度矩阵 R 中的元素 $r_{i,j,n}$ 为

$$r_{i,j,n} = s_{ij} - \max_{k \neq j} (a_{i,k,n-1} + \overline{ED}_{i,k}^{av}) \quad (15)$$

式中: $a_{i,k,n-1}$ 为第 $n-1$ 次迭代时的有效度。

设置有效度的初值为 0。

在有效度矩阵 A 中,元素 $a_{i,j}$ 的第 n 次迭代值计算公式如下:

$$a_{i,j,n} = \begin{cases} \min [0, r_{ij,n} + \sum_{k \in (ij)} \max(0, r_{kj,n})] & i \neq j \\ \sum_{k \neq j} \max(0, r_{kj,n}) & i = j \end{cases} \quad (16)$$

式中: $r_{ij,n}, r_{kj,n}$ 分别为第 n 次迭代时可靠度矩阵中元素 r_{ij}, r_{kj} 的数值。

3) 为减少迭代过程中的误差,迭代计算时设置误差系数 λ 。迭代过程中,可靠度和有效度是上一次迭代值和当前值的加权平均,则可靠度和

有效度更新迭代为

$$\begin{cases} r_{jj,n+1} = (1 - \lambda)r_{jj,n} + \lambda r_{jj,n} \\ a_{jj,n+1} = (1 - \lambda)a_{jj,n} + \lambda a_{jj,n} \end{cases} \quad (17)$$

误差系数 λ 的取值范围为 $(0, 1)$,用于平衡迭代过程中前、后两次结果的权重; λ 较小时收敛快但可能波动; λ 较大时结果平滑但收敛慢。

为保障可靠度矩阵 $\mathbf{R}$ 与有效度矩阵 $\mathbf{A}$ 迭代更新的收敛性,本文引入如下措施:

a)误差系数 λ :设定 $0 < \lambda < 1$,使更新过程为加权平均形式,保证了迭代结果为有界序列,避免发散。

b)收敛判据:除设定最大迭代次数外,另设两类判据,满足其一即终止迭代:(i)连续两次迭代聚类中心无显著变化;(ii)可靠度与有效度综合评价变化量低于阈值 ε (取 $\varepsilon = 10^{-3}$)。

c)应对不收敛的策略:迭代超最大次数仍未收敛时,采用:(i)调整 λ (增大 λ 以提升结果平滑性);(ii)重置初始有效度矩阵,避免局部振荡;(iii)启用备用聚类方法(如基于平均机电距离的静态划分),保障算法稳定与工程可实现性。

经算例仿真验证,上述措施可使迭代在有限步数内收敛,确保系统边界划分方法的可靠性。

若发电机节点 j 的可靠度 $r_{i,j}$ 和有效度 $a_{i,j}$ 越大,则节点 j 的复合机电距离成为聚类中心的可能性越大。将可靠度矩阵 $\mathbf{R}$ 和有效度矩阵 $\mathbf{A}$ 对应元素相加,以确定各节点的综合评价。然后,在每个节点的数据列中找到综合评价最大的复合机电距离,该数据即为该发电机节点所属的聚类中心。

满足以下任意条件时,停止迭代并输出聚类中心 c_s :①循环迭代超出预设的迭代次数;②连续两次迭代中,聚类中心不再发生变化。然后,根据每个节点的复合机电距离与聚类中心确定聚类结果。

4)根据聚类结果,将电力系统划分为研究区域和外部区域。将图1进行边界划分,如图3所示。划分前,研究区域和外部区域中的发电机可通过联络线参与调频。划分后,研究区域中发电机受机电扰动影响,参与调频。在等值模型中,外部区域发电机被简化为仅传输功率,其详细调频动态不予考虑,以聚焦研究区域的频率响应。

5)在相同故障下做时域仿真计算,比较本文区域划分等值频率响应模型和时域仿真法下的

频率动态特性吻合度,验证本文提出的边界划分方法的可靠性和精确性。

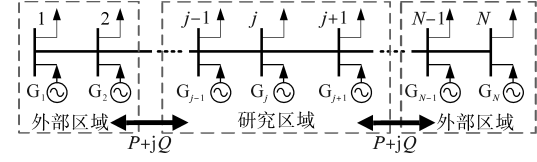


图3 区域划分示意图

Fig.3 Schematic diagram of area division

2.3 边界划分方法流程

根据2.1节边界划分具体步骤,本节所提出的基于机电扰动传播特征的系统边界划分方法流程如图4所示。本方法适用于大型互联电网,其中发电机和线路可近似为连续体模型,扰动规模较小以满足线性化假设。边界条件包括系统参数的均匀分布和扰动频率低于临界阈值的3倍。

本文方法基于连续体模型假设,即将电网发电机与线路近似为均匀分布的连续介质,以描述机电扰动传播特性。已有研究显示,中低离散度电网中,连续体模型与离散模型的扰动传播增衰规律一致,故本文方法在大规模互联电网中适用性较好;但电网离散程度较高时,连续体假设可能导致机电距离估计偏差,影响边界划分精度。为此,本文提出改进策略:高离散度区域优先采用基于实际节点电纳矩阵与发电机惯量的离散模型修正机电距离;引入混合建模方法,即整体

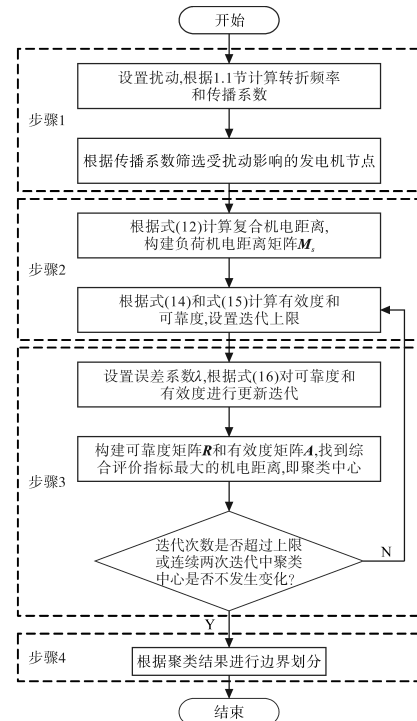


图4 边界划分流程图

Fig.4 Flow chart of boundary division method

电网用连续体假设,关键子网用离散校正,以保障边界划分精度。

3 等值系统频率响应建模

在电力系统中,汽轮机的传递函数为

$$G_{TT}(s) = \frac{\Delta P_T(s)}{\Delta \delta(s)} = \frac{1 + F_H T_R s}{(1 + T_C s)(1 + T_R s)} \quad (18)$$

调速器传递函数为

$$G_{nT}(s) = \frac{\Delta \omega(s)}{\Delta \delta(s)} = \frac{1}{R_T(1 + T_G s)} \quad (19)$$

式中: ΔP_T 为汽轮机的机械功率增量; $\Delta \delta$ 为汽轮机的气门开度增量; F_H 为高压涡轮机功率占比; T_R 为再热器时间常数; T_C 为汽室时间常数; R_T 为汽轮机调差系数; T_G 为调速器时间常数。

由于调速器的动态响应过程较快,可忽略 T_C , T_R 的动态响应过程,因此可令 $T_C=0$, $T_G=0$ 。则汽轮机-调速器模型的机械功率增量为

$$\begin{aligned} \Delta P_{mT}(s) &= G_{TT}(s)G_{nT}(s)\Delta \omega(s) \\ &= \frac{1 + F_H T_R s}{R_T(1 + T_C s)(1 + T_G s)(1 + T_R s)} \Delta \omega(s) \\ &\approx \frac{1 + F_H T_R s}{R_T(1 + T_R s)} \Delta \omega(s) \end{aligned} \quad (20)$$

设电力系统共有同步机 N 台,由于下垂系数 R 与额定容量 S_N 有关,多汽轮机-调速器的恒定增益为

$$K_{mi} = \sum_{i=1}^N \frac{S_{Ni}}{S_{sys}} \quad (21)$$

式中: S_{Ni} 为同步机 i 的额定功率; S_{sys} 为整个系统的额定功率; K_{mi} 为同步机 i 的额定功率占整个系统额定功率的比例。

电力系统等效下垂系数 R 为

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^N \frac{K_{mi}}{R_i} = \sum_{i=1}^N \kappa_i \quad (22)$$

式中: κ_i 为等效增益, $\kappa_i = K_{mi}/R_i$ 。

为简化描述,式(22)定义归一化增益 λ_i 表示同步机 i 的汽轮机-调速器的综合效应,如下式:

$$\begin{cases} \lambda_i = \frac{\kappa_i}{\sum_{i=1}^N \kappa_i} \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (23)$$

将多台同步机的传递函数聚合为一台等值机传递函数,如图5所示,可得到下式:

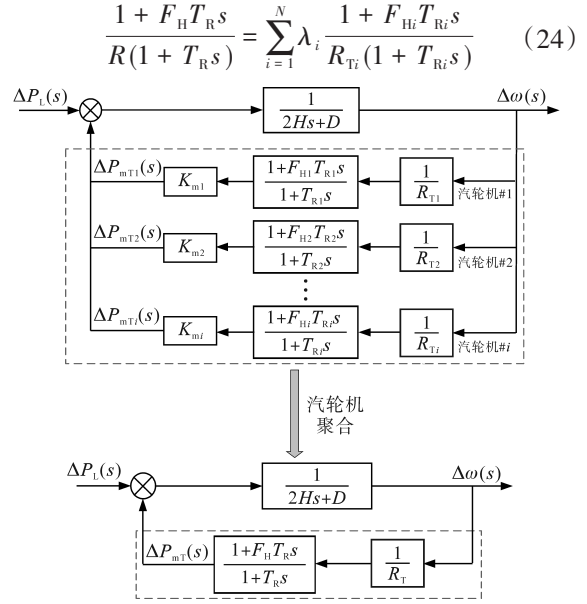


图5 系统频率响应聚合模型

Fig.5 Aggregated model of system frequency response

4 算例仿真及分析

在 Matlab/Simulink 搭建图6所示 IEEE 10机39节点系统模型,验证本文方法的有效性与准确性。算例中接入风电场 W_1 ,将节点35同步机替换为风电场 W_2 ,设定风速 10 m/s;线路及同步机参数如表1、表2所示。算例验证前设置如下:

1)在 $t=100$ s时,分别设置功率缺额扰动(在节点39处设置700 MW/1 400 MW突增负荷,占总负荷的10%/20%)、切机故障(G_8 因故障损失发电40%,切机量为360 MW)和断线故障(线路 L_{15-16} 在节点15处发生三相断线故障),模拟发生各种系统频率扰动事故,以验证本文所提方法的有效性。

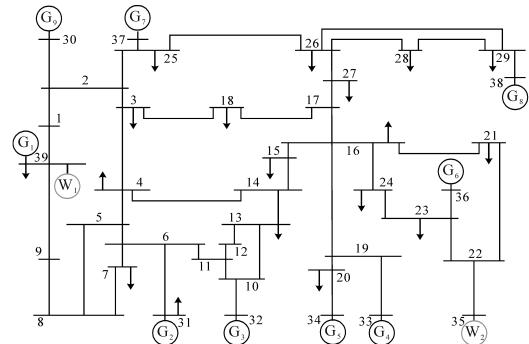


图6 IEEE 10机39节点算例系统

Fig.6 IEEE 10-machine 39-node example system

2)设定如下仿真项目:①按照1.1节和1.2节分别进行转折频率和复合机电距离计算,并用层次聚类将算例系统分为研究区域和外部区域。

②建立频率响应模型计算研究区域频率,与实际

算例系统的时域仿真频率特性比较,验证本文分类方法的可靠性。

表1 线路参数

Tab.1 Line parameters

起始 母线	终端 母线	电抗 X (标么值)	电阻 R (标么值)	电纳 B (标么值)
1	2	0.041 1	0.003 5	0.698 7
2	3	0.015 1	0.001 3	0.257 2
3	4	0.021 3	0.001 3	0.221 4
4	5	0.012 8	0.000 8	0.134 2
5	6	0.002 6	0.000 2	0.043 4
6	7	0.009 2	0.000 6	0.113 0
7	8	0.004 6	0.000 4	0.078 0
8	9	0.036 3	0.002 3	0.380 4
10	11	0.004 3	0.000 4	0.072 9
11	12	0.043 5	0.001 6	0.000 0
12	13	0.043 5	0.001 6	0.000 0
13	14	0.010 1	0.000 9	0.172 3
14	15	0.021 7	0.001 8	0.366 0
15	16	0.009 4	0.000 9	0.171 0
16	17	0.008 9	0.000 7	0.134 2
17	18	0.008 2	0.000 7	0.131 9
19	20	0.013 8	0.000 7	0.000 0
21	22	0.014 0	0.000 8	0.256 5
22	23	0.009 60	0.000 6	0.184 6
23	24	0.035 0	0.002 2	0.361 0
25	26	0.032 3	0.003 2	0.513 0
26	27	0.014 7	0.001 4	0.239 6
28	29	0.015 1	0.001 4	0.249 0
1	39	0.025 0	0.001 0	0.750 0
2	25	0.008 6	0.007 0	0.146 0
2	30	0.018 1	0.000 0	0.000 0
3	18	0.013 3	0.001 1	0.213 8
4	14	0.012 9	0.000 8	0.138 2
5	8	0.011 2	0.000 8	0.147 6
6	11	0.008 20	0.000 7	0.138 9
9	39	0.025 0	0.001 0	1.200 0
10	13	0.004 3	0.000 4	0.072 9
10	32	0.020 0	0.000 0	0.000 0
16	19	0.019 50	0.001 6	0.304 0
16	21	0.013 5	0.000 8	0.254 8
16	24	0.005 9	0.000 3	0.068 0
17	27	0.017 30	0.001 3	0.321 6
19	33	0.014 20	0.000 7	0.000 0
20	34	0.018 0	0.000 9	0.000 0
22	35	0.014 3	0.000 0	0.000 0
23	36	0.027 2	0.000 5	0.000 0
25	37	0.023 2	0.000 6	0.000 0
26	28	0.047 4	0.004 3	0.780 2
26	29	0.062 5	0.005 7	1.029 0
29	38	0.015 6	0.000 8	0.000 0
31	6	0.025 0	0.000 0	0.000 0

表2 同步发电机参数

Tab.2 Synchronous generator parameters

G	H/s	X_d (标么值)	x'_d (标么值)	X_q (标么值)	x'_q (标么值)	T'_{d0}/s	T'_{q0}/s	x_1/s
1	6.73	0.20	0.06	0.19	0.08	7.00	0.70	0.03
2	3.03	2.95	0.70	2.820	1.70	6.56	1.50	0.35
3	3.58	2.50	0.53	2.37	0.88	5.70	1.50	0.30
4	2.86	2.62	0.44	2.58	1.66	5.69	1.50	0.30
5	2.60	6.70	1.32	6.20	1.66	5.40	0.44	0.54
6	3.48	2.54	0.50	2.41	0.81	7.30	0.40	0.22
7	2.64	2.95	0.49	2.92	1.86	5.66	1.50	0.32
8	2.43	2.90	0.57	2.80	0.91	6.7	0.41	0.28
9	3.45	2.11	0.57	2.05	0.59	4.79	1.96	0.30
10	4.20	1.00	0.31	0.69	0.08	10.2	1.50	0.13

4.1 功率突增工况下的系统频率响应验证

当 $t=100\text{ s}$ 时,设置突增负荷700 MW/1 400 MW(位于节点39,占总负荷的10%/20%),模拟系统发生频率扰动事故并按照2.3节流程图执行。

通过计算得到各发电机节点转折频率 ω_c 和传播系数 PC ,如表3所示。由于发电机 G_6 和风电场 W_2 的传播系数 PC 均超过临界阈值3,说明机电波扰动传播至节点35和节点36时,其扰动幅值基本衰减为零,此时 G_6 和 W_2 受机电波扰动影响较小,对机电波扰动做出响应可以忽略。因此,将 G_6 和 W_2 划分为外部区域,不作为主要研究对象。

表3 转折频率与传播系数计算结果(功率突增)

Tab.3 Calculation results of corner frequency and propagation coefficient (power surge)

同步机/风电场	节点	$\frac{\omega_c}{\omega_0}/\%$	$\frac{\Delta\omega}{\omega_0}/\%$	PC
G_1+W_1	39	—	—	—
G_2	31	5.568	2.614	2.13
G_3	32	6.820	2.613	2.61
G_4	33	6.783	2.315	2.93
G_5	34	6.362	2.264	2.81
G_6	36	6.471	1.721	3.76
G_7	37	5.408	2.563	2.11
G_8	38	6.234	2.464	2.53
G_9	30	5.252	2.613	2.01
W_2	35	6.663	1.977	3.37

基于上述转折频率计算结果,计算扰动源点 G_1 与受机电波扰动影响的发电机 $G_2, G_3, G_4, G_5, G_7, G_8, G_9$ 之间的复合机电距离 $\overline{ED}^{av}$,如表4所示。

表4 复合机电距离计算结果(功率突增)

Tab.4 Calculation results of composite electromechanical distance (power surge)				
扰动源点 <i>i</i>	受扰动影响的发电机	$\overline{ED}_{ij}/s$	$\overline{ED}_{jd}/s$	$\overline{ED}^{av}/s$
	节点 <i>j</i>			
39	30	0.30/0.212	0.46/0.325	0.380/0.269
39	31	0.26/0.184	0.48/0.339	0.370/0.262
39	32	0.31/0.219	0.50/0.354	0.405/0.286
39	33	0.27/0.191	0.53/0.375	0.400/0.283
39	34	0.30/0.212	0.52/0.368	0.410/0.290
39	37	0.23/0.163	0.47/0.332	0.350/0.247
39	38	0.31/0.219	0.49/0.346	0.400/0.282

对上述复合机电距离进行层次聚类,可清晰地观察到不同发电机组之间的联系强度,结果如图7所示。由图7层次聚类结果可知,发电机 $G_1, G_2, G_3, G_4, G_7, G_8, G_9$ 机组之间的联系非常紧密,形成了一个较为集中的聚类,因此将与扰动源点 G_1 联系紧密的发电机 $G_2, G_3, G_4, G_7, G_8, G_9$ 划为研究区域。发电机 G_5 与系统中其他各发电机联系较弱,因此将 G_5 归入外部区域。由上述结果可知, $G_1, G_2, G_3, G_4, G_7, G_8, G_9$ 和 W_1 为研究区域, G_5, G_6 和 W_2 为外部区域。

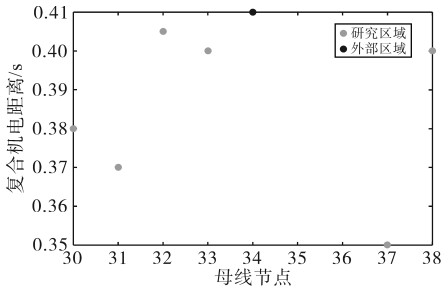


图7 功率突增工况下的层次聚类结果
Fig.7 Hierarchical clustering results under power surge condition

对完整39节点算例系统采用时域仿真法,计算系统频率特性和相关指标,称方法①,该方法反映完整实际系统的频率特性。根据系统中风电机组的常数化虚拟惯性时间常数和同步机惯性常数,聚合求解系统等效惯性常数,建立考虑系统边界划分后的SFR模型,计算系统频率特性和相关指标,称方法②。通过比较两种方法下的频率动态特性和相关指标的吻合度,可以反映本文所提方法的准确性。仿真计算频率响应曲线如图8所示。

由图8可知,当功率突增占负荷总比10%时,在 $t=112.68\text{ s}$ 时频率相差最大,实际频率为49.785 Hz,研究区域频率为49.768 Hz,仅相差

0.017 Hz;当功率突增占负荷总比20%时,在 $t=114.17\text{ s}$ 时频率相差最大,实际频率为49.559 Hz,研究区域频率为49.537 Hz,仅相差0.021 Hz。说明本文所提方法在系统发生功率突增工况时具有较高的精度。

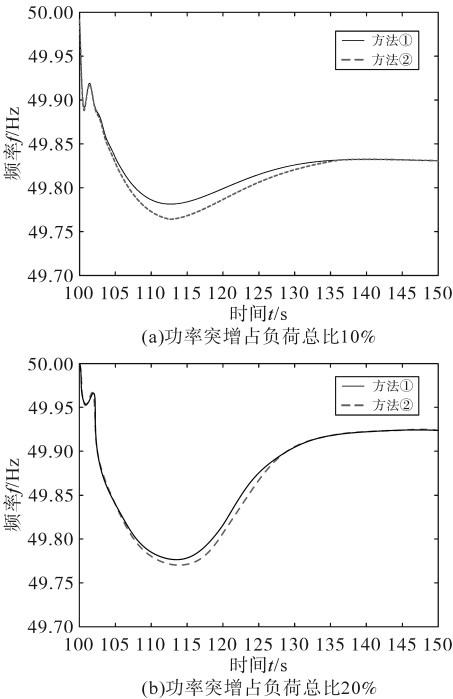


图8 功率突增情况下的频率响应曲线对比
Fig.8 Comparison of system frequency response under power surge condition

4.2 切机故障工况下的系统频率响应验证

当 $t=100\text{ s}$ 时,设置切机故障(G_8 因故障损失发电40%,切机量为360 MW),模拟系统发生频率扰动事故并按照2.3节流程图执行。

根据1.1节、1.2节,计算各发电机节点的转折频率 ω_c 和传播系数 PC ,如表5所示。由上述分

表5 转折频率与传播系数计算结果(切机故障)

Tab.5 Calculation results of corner frequency and propagation coefficient (generator tripping fault)				
同步机/风电场	节点	$\frac{\omega_c}{\omega_0}/\%$	$\frac{\Delta\omega}{\omega_0}/\%$	PC
G_8	38	—	—	—
G_1+W_1	39	5.882	2.325	2.53
G_2	31	6.170	1.864	3.31
G_3	32	5.581	1.783	3.13
G_4	33	5.912	2.104	2.81
G_5	34	5.840	2.035	2.87
G_6	36	5.429	2.163	2.51
G_7	37	5.848	2.510	2.33
G_9	30	5.859	2.431	2.41
W_2	35	5.766	2.089	2.76

析可知,由于发电机 G_2, G_3 的传播系数 PC 均超过临界阈值3,表明当机电波扰动传播至节点31和节点32时,其扰动幅值基本衰减为零,此时 G_2, G_3 受机电波扰动影响较小,对机电波扰动做出响应可以忽略。因此, G_2, G_3 划分为外部区域,不作为主要研究对象。

基于上述转折频率计算结果,计算扰动源点 G_9 与受机电波扰动影响的发电机 $G_1, G_4, G_5, G_7, G_8, G_{10}$ 和风电场 W_1, W_2 之间的复合机电距离 $\overline{ED}^{av}$,如表6所示。

表6 复合机电距离计算结果(切机故障)
Tab.6 Calculation results of composite electromechanical distance (generator tripping fault)

扰动源点 <i>i</i>	受扰动影响的发电机节点 <i>j</i>	$\overline{ED}_{ij}/s$	$\overline{ED}_{ji}/s$	$\overline{ED}^{av}/s$
38	30	0.41	0.30	0.355
38	33	0.37	0.32	0.345
38	34	0.35	0.33	0.340
38	35	0.43	0.36	0.395
38	36	0.33	0.35	0.340
38	37	0.30	0.29	0.295
38	39	0.51	0.30	0.405

对上述复合机电距离进行层次聚类,可清晰地观察到不同发电机组之间的联系强度,聚类结果如图9所示。由图9可知,发电机 $G_1, G_4, G_5, G_6, G_7, G_8, G_9$ 机组之间的联系非常紧密,形成了一个较为集中的聚类,因此将与扰动源 G_8 联系紧密的发电机 $G_1, G_4, G_5, G_6, G_7, G_9$ 和风电场 W_1 划为研究区域。风电场 W_2 与系统中其他各发电机联系较弱,因此将 W_2 归入外部区域。由上述结果可知, $G_1, G_4, G_5, G_6, G_7, G_8, G_9$ 和 W_1 为研究区域; G_2, G_3 和 W_2 为外部区域。

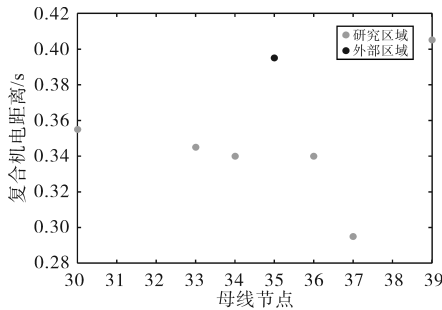


图9 切机故障下的层次聚类结果

Fig.9 Hierarchical clustering results under generator tripping fault

对完整39节点算例系统采用时域仿真法,计算系统频率特性和相关指标,称方法①。聚合求解系统等效惯性常数,建立考虑系统边界划分后的SFR模型,计算系统频率特性和相关指标,称

方法②。通过比较两种方法下的频率动态特性和相关指标的吻合度,可以反映本文所提方法在切机故障下的准确性。仿真计算频率响应曲线如图10所示。

由图10可知,在 $t=112.68$ s时频率相差最大,实际频率为49.813 Hz,研究区域频率为48.802 Hz,仅相差0.011 Hz,说明本文所提方法在系统发生切机故障时具有较高的精度。

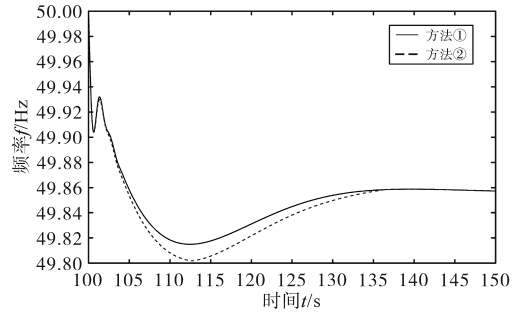


图10 切机故障下的频率响应曲线对比

Fig.10 Comparison of frequency response curves under generator tripping fault

4.3 断线故障工况下的系统频率响应验证

当 $t=100$ s时,线路 L_{15-16} 于节点15处发生三相断线故障,模拟系统发生频率扰动事故并按照2.3节流程图执行。节点15处发生三相断线故障,切除了局部负荷,导致系统整体呈现发电过剩状态。由于发电机 G_4 与节点15的电气距离最近,故选择节点33(发电机 G_4)作为频率测点。

计算各发电机节点的转折频率 ω_c 和传播系数 PC ,如表7所示。由上述分析可知,由于没有传播系数 PC 超过临界阈值3,因此将所有发电机作为研究对象,计算复合机电距离。

基于上述转折频率计算结果,计算 G_4 与受机电波扰动影响的发电机 $G_1, G_2, G_3, G_5, G_6, G_7, G_8$,

表7 转折频率与传播系数计算结果(断线故障)

Tab.7 Calculation results of corner frequency and propagation coefficient (line outage fault)

同步机/风电场	节点	$\frac{\omega_c}{\omega_0} / \%$	$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} / \%$	PC
G_4	33	—	—	—
G_1+W_1	39	4.210	1.769	2.38
G_2	31	4.697	1.864	2.52
G_3	32	4.386	1.783	2.46
G_5	34	4.476	1.913	2.34
G_6	36	4.367	1.768	2.47
G_7	37	4.979	1.611	2.91
G_8	38	4.363	1.610	2.71
G_9	30	4.688	1.589	2.95
W_2	35	4.411	1.877	2.35

G_9 和风电场 W_1, W_2 之间的复合机电距离 $\overline{ED}^{av}$,如表8所示。

表8 复合机电距离计算结果(断线故障)

Tab.8 Calculation results of composite electromechanical distance (line outage fault)

频率 测点 <i>i</i>	受扰动影响的 发电机节点 <i>j</i>	$\overline{ED}_{ij}/s$	$\overline{ED}_{ji}/s$	$\overline{ED}^{av}/s$
33	30	0.42	0.39	0.410
33	31	0.40	0.41	0.405
33	32	0.52	0.47	0.495
33	34	0.27	0.30	0.285
33	35	0.40	0.33	0.365
33	36	0.30	0.32	0.310
33	37	0.25	0.35	0.300
33	38	0.41	0.37	0.390
33	39	0.53	0.38	0.455

对上述复合机电距离进行层次聚类,可清晰地观察到不同发电机组之间的联系强度,如图11所示。由图11层次聚类结果可知, $G_1, G_2, G_4, G_5, G_6, G_7, G_8, G_9$ 和风电场 W_1, W_2 之间的联系非常紧密,形成了一个较为集中的聚类,因此选择与频率测点 G_4 联系紧密的 $G_1, G_2, G_5, G_6, G_7, G_8, G_9, G_{10}$ 和 W_1, W_2 划为研究区域。发电机 G_3 与系统中其他各发电机联系较弱,因此将 G_3 归入外部区域。由上述结果可知, $G_1, G_2, G_4, G_5, G_6, G_7, G_8, G_9$ 和 W_1, W_2 为研究区域, G_3 为外部区域。

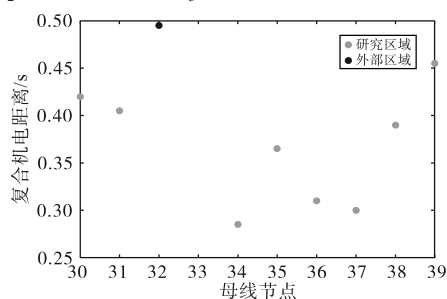


图11 断线故障下的层次聚类结果

Fig.11 Hierarchical clustering results under line outage fault

对完整39节点算例系统采用时域仿真法,称方法①。聚合求解系统等效惯性常数,建立考虑系统边界划分后的SFR模型,计算系统频率特性和相关指标,称方法②。通过比较两种方法下的频率动态特性和相关指标的吻合度,可以反映本文所提方法在断线故障下的准确性。仿真计算频率响应曲线如图12所示。

由图12可知,在 $t=111.82\text{ s}$ 时频率相差最大,

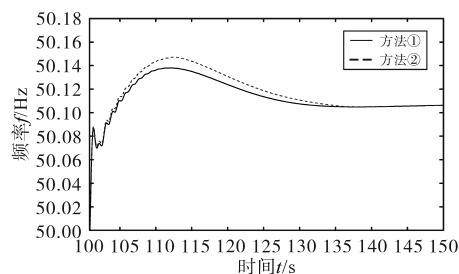


图12 断线故障下的频率响应曲线对比

Fig.12 Comparison of frequency response curves under line outage fault

实际频率为50.138 Hz,研究区域频率为50.148 Hz,仅相差0.010 Hz,说明本文所提方法在系统发生断线故障时具有较高的精度。

5 结论

为改善大量新能源接入后电网规模扩大导致传统响应模型难以适配的问题,本文提出基于机电扰动传播特征的系统边界划分方法,经理论分析与时域仿真,得出结论:本文提出的基于机电扰动传播特征的系统边界划分方法,针对传统频率响应模型难以适应复杂大规模电力系统、难以简单高效计算分析系统频率响应特性而设计。该方法通过分析机电扰动传播,确定受扰发电机组,进而建立简化的系统频率响应模型。算例验证表明,3种不同扰动工况下,研究区域的频率响应模型均能反映与实际系统相似的频率动态过程。

参考文献

- [1] 陈勋. 基于深度强化学习的储能系统能量管理与优化调度策略[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2439-2441.
Chen Xun. Energy management and optimal scheduling strategies for energy storage systems based on deep reinforcement learning[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(6): 2439-2441.
- [2] 李世春,石明达,张业丽,等. 跟网型风电机组“虚拟惯性常数”常数化计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(2): 141-150.
Li Shichun, Shi Mingda, Zhang Yeli, et al. Constantized calculation method of "virtual inertia constant" for grid-following wind turbines[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2025, 37(2): 141-150.
- [3] 赵熙临,李品,付波. 基于频率响应特性的储能辅助电网调频方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 41-49, 67.
Zhao Xilin, Li Pin, Fu Bo. Frequency regulation method assisted by energy storage based on frequency response characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 41-49, 67.

- 41-49, 67.
- [4] Zhao Mingquan, Yuan Xiaoming, Hu Jiabing, et al. Voltage dynamics of current control time-scale in a VSC-connected weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2925-2937.
 - [5] 蔡成鑫, 谢岩, 唐晓骏, 等. 基于机电波透射系数的节点频率时空差异分群方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(24): 66-78.
Cai Chengxin, Xie Yan, Tang Xiaojun, et al. Spatio-temporal difference clustering method for nodal frequency based on electromechanical wave transmission coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(24): 66-78.
 - [6] 蔡国伟, 钟超, 吴刚, 等. 考虑风电机组超速减载与惯量控制的电力系统机组组合策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 134-142.
Cai Guowei, Zhong Chao, Wu Gang, et al. Unit commitment strategy of power system considering overspeed load reduction and inertia control of wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 134-142.
 - [7] Anderson P M, Mirhydar M. A low-order system frequency-response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
 - [8] 徐英. 基于PSASP的山西电网稳定性分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
Xu Ying. Stability analysis of Shanxi power grid based on PSASP[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007.
 - [9] 郭成, 李群湛, 王德林. 电力系统机电扰动的传播特性[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 124-127.
Guo Cheng, Li Qunzhan, Wang Delin. Propagation characteristic of electromechanical disturbance in power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 124-127.
 - [10] Rudez Urban, Mihalic Rafael. A method of detecting the time of arrival for an electromechanical wave in large power systems [C]//IEEE Grenoble PowerTech (POWERTECH) Conference, France, 2013: 1-6.
 - [11] Thorp J S, Seyler C E, Phadke A G. Electromechanical wave propagation in large electric power systems[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems, 1998, 45(6): 614-622.
 - [12] 王德林, 王晓茹, Thorp James S. 电力系统的连续体系机电波模型[J]. 中国电机工程学报, 2006(17): 30-37.
Wang Delin, Wang Xiaoru, Thorp James S. Electromechanical wave continuum model for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006(17): 30-37.
 - [13] 王德林, 王晓茹. 电力系统中机电扰动的传播特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007(19): 18-24.
Wang Delin, Wang Xiaoru. Characteristic analysis of electromechanical disturbance propagation for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007(19): 18-24.
 - [14] Wang Delin, Wang Xiaoru, Thorp James S. Study on electromechanical wave continuum model for power systems in mechanics[C]//2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES, 2006.
 - [15] 王德林, 郭成. 电力系统连续体和离散模型中机电扰动传播的一致性研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 161-167.
Wang Delin, Guo Cheng. Study on consistency of electromechanical disturbance propagation in continuum and discrete-models for power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 161-167.
 - [16] Li Tianya, Ledwich G, Mishra Y, et al. Wave aspect of power system transient stability—Part I: finite approximation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2493-2500.
 - [17] 马大强. 电力系统机电暂态过程[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
Ma Daqiang. Electromechanical transient process of power systems[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1988.
 - [18] Lee S T Y, Schweppe F C. Distance measures and coherency recognition for transient stability equivalents[J]. IEEE Trans. on PAS, 1973, 92(5): 1550-1557.
 - [19] 黄强, 吴际舜. 互联电力系统的实用同调分区法[J]. 上海交通大学学报, 1988(4): 62-74, 117-118.
Huang Qiang, Wu Jishun. Practical coherency partitioning method for interconnected power systems[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1988(4): 62-74, 117-118.
 - [20] Pai M A, Adgaonkar R P. Electromechanical distance measure for decomposition of power systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1984, 6(4): 249-254.
 - [21] Oscar Y L. Development of intelligent, robust, and nonlinear models in dynamic equivalencing for interconnected power systems[D]. Michael Fette: University of Paderborn, 2006.
 - [22] 赵波, 章德, 胡柳君, 等. 基于机电扰动传播特性的电网惯量分布辨识方法[J]. 电力建设, 2020, 41(8): 25-31.
Zhao Bo, Zhang De, Hu Liujun, et al. Inertia-distribution estimation method based on characteristics of electromechanical disturbance propagation[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(8): 25-31.
 - [23] Parashar M, Thorp J S, Seyler C E. Continuum modeling of electromechanical dynamics in large-scale power systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I-Regular Papers, 2004, 51(9): 1848-1858.
 - [24] Bi Tianshu, Qin Junda, Yan Yuehao, et al. Disturbance propagation mechanism based on the electromechanical wave theory [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(12): 2891-2898.
 - [25] 王德林, 王小艳. 基于连续体模型的电力系统机电距离研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 25-31, 36.
Wang Delin, Wang Xiaoyan. Study on electromechanical distance of power systems based on continuous medium model[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 25-31, 36.

收稿日期: 2025-08-09

修改稿日期: 2025-09-26