

基于支路模式振荡能量的低频振荡区域定位方法

孙正龙¹, 王嘉琛¹, 潘超¹, 杨浩¹, Yoash Levron², 蔡国伟¹

- (1. 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), 吉林省 吉林市 132012;
2. 以色列理工学院电气工程系, 以色列 海法 3200003)

Low-frequency Oscillation Area Location Method Based on Branch Mode Oscillation Energy

SUN Zhenglong¹, WANG Jiachen¹, PAN Chao¹, YANG Hao¹, Yoash Levron², CAI Guowei¹

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

2. The Andrew and Erna Viterbi Faculty of Electrical Engineering, Technion, Israel Institute of Technology, Haifa 3200003, Israel)

ABSTRACT: When low-frequency oscillations occur in a power system, the oscillating generators exchange oscillation energy through the branches in the network, so the branches contain rich oscillation information. Aiming at the problem of identifying the oscillation region in different modes, a low-frequency oscillation region location method based on the branch mode oscillation energy is proposed in this paper. First, on the basis of deriving the power system energy function satisfying the law of energy conservation, the branch oscillation energy is defined to study the system oscillation law from the perspective of network. It is found that the branch oscillation energy is superimposed by several branch oscillation modes, and a method for extracting the branch oscillation energy in multiple modes is proposed. Then, the analytical relationship between the branch mode oscillation energy and generator state variables is established through theoretical derivation, which lays a foundation for the study of low-frequency oscillation problems by using the branch mode oscillation energy. Finally, a low-frequency oscillation region localization method based on branch mode oscillation energy is established, and the effectiveness of the method is verified by simulation analysis.

KEY WORDS: localization of oscillation region; low-frequency oscillation; energy conservation; branch mode oscillation energy

摘要: 电力系统发生低频振荡时,参与振荡的机组通过网络中的支路交换振荡能量,故支路上蕴含丰富的振荡信息。针对系统不同模式下振荡区域的识别问题,该文提出一种基于支路模式振荡能量的低频振荡区域定位方法。首先,在推导

满足能量守恒定律的电力系统能量函数基础上,定义从网络角度研究系统振荡规律的支路振荡能量;解析发现支路振荡能量由多个支路模式振荡能量叠加而成,并提出多模式下支路模式振荡能量的提取方法;随后,通过理论推导建立支路模式振荡能量与发电机状态变量之间的解析关系,为采用支路模式振荡能量研究低频振荡问题奠定了基础;最后,建立基于支路模式振荡能量的低频振荡区域定位方法,并通过仿真分析验证了该方法的有效性。

关键词: 振荡区域定位; 低频振荡; 能量守恒; 支路模式振荡能量

0 引言

电力系统低频振荡严重威胁电网安全稳定运行^[1-2],国内外已记录多起低频振荡事故,如1996年,美国西部联合电网发生的低频振荡^[3];1994年至2005年间,南方电网曾发生多起低频振荡事件,导致系统解列^[4];2005年,蒙西电网与华北主网网发生持续数分钟的低频振荡,造成了严重的影响^[5];2010年,三峡电厂由于外送功率振荡,引发临近电网功率大幅波动^[6]。随着电网运行方式更为多变、系统模型愈加复杂,低频振荡的起因与振荡特征也日趋多样。

在大电网发生低频振荡时,准确、快速的定位振荡区域,对于采取紧急措施抑制以低频振荡至关重要。文献[7]根据模态信息进行振荡机组分群,这种基于小干扰稳定性分析的机群划分方法虽然可给出所有机组的分群信息,但无法直接给出非发电机节点的分群信息;文献[8]根据振荡中心附近节点的电压特征,将系统在振荡中心处分为2个独立的

网络,但对于大电网无法准确识别振荡区域;文献[9]根据各机组间角速度的相关系数将振荡机组分为主动群和被动群,但是相关系数阈值的设定可能会影响此方法的准确性,且未能解决多模式下的低频振荡问题。

以上研究都是从机群角度将系统分为两个振荡区域,但对于大电网而言划分不够准确。本文结合网络中各节点的电压幅值、相角特征与系统稳态潮流信息,实现大电网、多模式下更为全面、准确的低频振荡区域定位,为进一步的低频振荡抑制策略提供坚实基础。

在自然界中的振荡现象广泛存在,同时振荡伴随着能量的转化与传输,能量函数法是分析电力系统低频振荡的一种思路方法。文献[10-11]证明发电机能量耗散与阻尼转矩之间的关系,并提出能量流的实用计算方法;文献[12]在其基础上构建割集振荡能量,可更快定位振荡源;文献[13]研究模态分析和振荡能量分析之间的联系,提出综合特征值分析和能量分析的发电机能量消耗系数指标;文献[14]通过弹性力学映射电力系统,提出一种在低频振荡发生时对发电机阻尼贡献进行在线评估的方法;文献[15]构建含双馈风机的电力系统暂态能量函数,提出含风电电力系统机电振荡局部阻尼评估方法;文献[16]通过端口供给能量分解,得出弱阻尼振荡和强迫振荡下端口供给能量中趋势分量的不同变化规律;文献[17]结合熵理论,利用熵差综合分类判据区分振荡类型;文献[18]构建基于网络信息的暂态稳定性研究方法一支路势能法,可进行定性和定量分析;文献[19]在其基础上提出用所有支路中分担暂态能量最大的支路或割集确定对系统暂态稳定性影响最为关键的输电环节;文献[20]针对风电并网后小干扰稳定问题,分析双馈风机并网后不同风电渗透率对系统模式振荡割集的影响;文献[21]通过分析振荡能量的分布来研究区间振荡特性,并提出模态动能参与因子来评估每个发电机在振荡中的参与,但其振荡能量仍须通过变化量来计算。

目前,从能量流角度进行的低频振荡研究已较为清晰,通过判断发电机或发电机端口能量的产生、耗散,可进行振荡源的定位,但却不适合应用于低频振荡区域的定位。由于振荡源与振荡区域并不相同,同时相比于发电机元件,网络中的支路元件数量更多,仅通过发电机元件进行扰动区域识别

对于大电网而言结果可信度低;此外,随着高比例新能源并网,特别是在电网要求新能源机组提供惯量和频率支撑的背景下,构网型新能源机组将主动参与振荡,再叠加新能源机组出力波动性的影响,传统“离线计算,在线匹配”的低频振荡监控手段面临挑战。因此本文在能量函数的基础上,从元件储存、释放能量的角度构建系统振荡能量守恒,解析网络中各支路分担的振荡能量,量化网络关键支路参与低频振荡的程度,形成了基于支路量测信息的“在线计算,在线识别”的低频振荡区域定位方法,进一步丰富了低频振荡能量函数法的理论体系;其次,现有能量函数法在结合 WAMS 进行实际应用时,由于电力系统强时变、多工况的特点,所需要的电气量稳态值难以确定,故可能面临方法准确性降低的问题,本文提出的方法可避免稳态值的确定,具有工程应用的潜力。

本文第二节证明小扰动下系统振荡能量守恒,定义支路振荡能量;第三节对支路振荡能量进行解析与化简,在时频域分别验证化简的正确性,定义支路模式振荡能量与网络模式振荡能量,并说明实际工程中的获取方法;第四节将支路模式振荡能量与特征值分析相联系,推导系统模式状态变量与支路模式振荡能量之间的关系式,并结合系统右特征向量,说明发电机转速状态变量模式可观性与支路模式振荡能量之间的联系;第五节进一步定义支路模式振荡能量分担度,介绍基于支路模式振荡能量的低频振荡区域定位方法的具体步骤;第六节分别在四机两区系统和 10 机 39 节点系统中验证了方法的有效性;最后一节对本文进行结论总结。

1 系统振荡能量守恒及支路振荡能量

1.1 系统振荡能量守恒

考虑一个 n 节点电力系统,采用结构保留模型,根据基尔霍夫电流定律,节点电流方程可以表示为

$$\sum_{i=1}^{n_B} (\sum_{j=1}^{n_B} I_{ij}^*) - \sum_{i=1}^{n_G} I_{Gi}^* + \sum_{i=1}^{n_L} I_{Li}^* = 0 \quad (1)$$

式中: I_{ij} 为支路 $i-j$ 上由 i 节点流向 j 节点的电流; I_{Gi} 和 I_{Li} 分别为发电机流入系统的电流以及系统流入负荷的电流,均为 n 维复向量; n_B 、 n_G 和 n_L 分别为网络中的节点数、发电机数和负荷数。

此方程在系统运行的任意时刻都满足,因此在系统轨迹上的任一点,均有^[22]:

$$\left\{ \left[\sum_{i=1}^{n_B} \left(\sum_{j=1}^{n_B} I_{ij}^* \right) - \sum_{i=1}^{n_G} I_{Gi}^* + \sum_{i=1}^{n_L} I_{Li}^* \right]^T dV_i \right\} = 0 \quad (2)$$

式中 V_i 为节点 i 的电压向量。

对式(2)取虚部(用函数 Im 表示)并沿系统运行轨迹积分, 有:

$$E_{\text{all}} = \int \text{Im} \left\{ \left[\sum_{i=1}^{n_B} \left(\sum_{j=1}^{n_B} I_{ij}^* \right) - \sum_{i=1}^{n_G} I_{Gi}^* + \sum_{i=1}^{n_L} I_{Li}^* \right]^T dV_i \right\} = c \quad (3)$$

式中: c 为常数; E_{all} 为系统受到小扰动后, 由故障处注入网络各支路、各发电机与各负荷的总振荡能量。

可将式(3)进一步写为

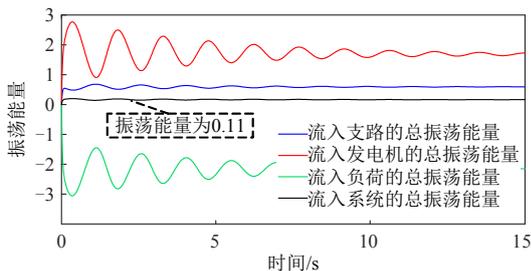
$$\int \text{Im} \left[\sum_{i=1}^{n_B} \left(\sum_{j=1}^{n_B} I_{ij}^* \right) dV_i \right] - \int \text{Im} \left[\sum_{i=1}^{n_G} I_{Gi}^* dV_i \right] + \int \text{Im} \left[\sum_{i=1}^{n_L} I_{Li}^* dV_i \right] = c \quad (4)$$

式中左侧 3 项分别表示为当弱阻尼系统受到小扰动时, 注入网络、发电机和负荷这 3 类网络元件的总振荡能量。

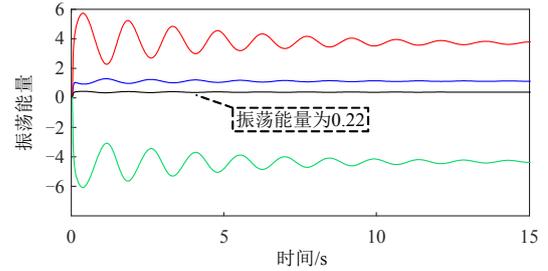
式(4)说明, 在系统恢复到稳定状态的过程中, 系统的各电气量, 如 I_{ij} 、 I_{Gj} 、 I_{Lj} 、 V_i 都在发生不同程度的振荡, 因此流入网络各支路、发电机与负荷的振荡能量也都是振荡的, 且这三者在系统振荡过程中存在着彼此的交互, 但交互过程中三者加和所代表的由扰动源注入系统的总能量始终是守恒的, 满足能量守恒定律。三者之和 c 应为扰动注入的能量, 并且随扰动时间的增加, 扰动注入的能量也越大。

在四机两区系统中分别进行扰动时间为 0.01 和 0.02s 的三相短路故障仿真, 流入网络部分、发电机部分、负荷部分和流入系统的振荡能量情况如图 1 所示。

由图 1(a)可见, 扰动时间为 0.01s 时, 扰动源注入系统的振荡能量为 0.11; 由图 1(b)可见, 扰动时间为 0.2s 时, 扰动源注入系统的振荡能量为 0.22, 从而验证了系统振荡能量守恒。



(a) 扰动时间0.01s



(b) 扰动时间0.22s

图 1 系统振荡能量守恒验证

Fig. 1 Verification of system oscillation energy conservation

1.2 支路振荡能量

在振荡从发生到平息的过程中支路部分与发电机部分、负荷部分存在能量交互, 即振荡能量的交互以网络中的各支路为媒介, 同时三者存在式(4)的守恒约束关系。因此可以通过流入网络中各支路的振荡能量反映各发电机和各负荷的振荡状况, 从而反映全系统的振荡状况, 进而可将式(4)写为

$$E_B = -E_{G\&L} + c \quad (5)$$

$$\text{其中: } \begin{cases} E_B = \int \text{Im} \left[\sum_{i=1}^{n_B} \left(\sum_{j=1}^{n_B} I_{ij}^* \right) dV_i \right] \\ E_{G\&L} = -\int \text{Im} \left[\sum_{i=1}^{n_G} I_{Gi}^* dV_i \right] + \int \text{Im} \left[\sum_{i=1}^{n_L} I_{Li}^* dV_i \right] \end{cases}$$

式中: E_B 表示系统中全部支路元件的振荡总能量, $E_{G\&L}$ 表示系统中全部发电机元件和负荷元件的振荡总能量之和。

对于网络中任意一条支路 $i-j$, 振荡能量将从其两端点流入该支路, 定义支路振荡能量, 记为 E_{bij} , 则有:

$$\begin{aligned} E_{bij} &= \int \text{Im} [I_{ij}^* dV_i + I_{ji}^* dV_j] = \int \text{Im} \left[\frac{P_{ij} + jQ_{ij}}{V_i e^{j\theta_i}} \right. \\ &\quad \left. (e^{j\theta_i} dV_i + jV_i e^{j\theta_i} d\theta_i) + \frac{P_{ji} + jQ_{ji}}{V_j e^{j\theta_j}} \right. \\ &\quad \left. (e^{j\theta_j} dV_j + jV_j e^{j\theta_j} d\theta_j) \right] = \int P_{ij} d\theta_i + \\ &\quad P_{ji} d\theta_j + Q_{ij} d \ln V_i + Q_{ji} d \ln V_j \end{aligned} \quad (6)$$

式中: P_{ij} 为支路 $i-j$ 上由 i 节点流向 j 节点的有功功率; P_{ji} 为支路 $i-j$ 上由 j 节点流向 i 节点的有功功率; Q_{ij} 为支路 $i-j$ 上由 i 节点流向 j 节点的无功功率; Q_{ji} 为支路 $i-j$ 上由 j 节点流向 i 节点的无功功率; θ_i 、 θ_j 分别为 i 、 j 节点电压向量的角度; V_i 、 V_j 分别为 i 、 j 节点电压向量的幅值。

通过观察网络中各支路分担的振荡能量, 可以对网络的振荡情况进行细致刻画, 进而对系统整体

振荡状况的观测也更为准确。在实际中,系统发生的低频振荡往往由多个模式叠加,而传统的特征值分析方法只能观测到对应于全系统的低频振荡模式信息,无法精细到网络中的元件级,因此可将支路振荡能量结合振荡模式的概念,更为具体的观测不同模式下系统的振荡情况。

2 支路振荡能量解析及支路模式振荡能量

2.1 支路振荡能量解析

当系统发生低频振荡时,系统中的有功功率、无功功率、电压幅值和电压相角都会发生不同程度的振荡,这些电气量信号由稳态量和不同振荡频率的振荡分量所组成,且这些分量的振荡频率与振荡模式相对应^[23],以有功功率为例:

$$\begin{cases} P = P_s + \Delta P \\ \Delta P = P_{\lambda_1} + \dots + P_{\lambda_k} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P 为系统发生低频振荡时完整的有功功率信号; P_s 为有功功率稳态量,即系统正常运行时的有功功率; ΔP 为振荡量,即振荡过程中的有功功率变化量; $P_{\lambda_1} \dots P_{\lambda_k}$ 表示振荡量 ΔP 中对应不同模式的变化量,即有功功率模式振荡分量。

同理,对于其他的电气量信号,如:无功功率、电压相角和电压幅值也存在式(7)的组成形式,因此可将支路振荡能量 E_{bij} 进一步改写为

$$\begin{aligned} E_{bij} = & \int [(P_{ijs} + \Delta P_{ij}) d(\theta_{is} + \Delta \theta_i) + (P_{jis} + \Delta P_{ji}) d(\theta_{js} + \\ & \Delta \theta_j) + (Q_{ijs} + \Delta Q_{ij}) d(\ln V_{is} + \Delta \ln V_i) + (Q_{jis} + \\ & \Delta Q_{ji}) d(\ln V_{js} + \Delta \ln V_j)] = \int [(P_{ijs} + P_{ij,\lambda_1} + \dots + \\ & P_{ij,\lambda_k}) d(\theta_{is} + \theta_{i,\lambda_1} + \dots + \theta_{i,\lambda_k}) + (P_{jis} + P_{ji,\lambda_1} + \dots + \\ & P_{ji,\lambda_k}) d(\theta_{js} + \theta_{j,\lambda_1} + \dots + \theta_{j,\lambda_k}) + (Q_{ijs} + Q_{ij,\lambda_1} + \dots + \\ & Q_{ij,\lambda_k}) d(\ln V_{is} + \ln V_{i,\lambda_1} + \dots + \ln V_{i,\lambda_k}) + (Q_{jis} + \\ & Q_{ji,\lambda_1} + \dots + Q_{ji,\lambda_k}) d(\ln V_{js} + \ln V_{j,\lambda_1} + \dots + \ln V_{j,\lambda_k})] \quad (8) \end{aligned}$$

下文以式(8)右侧第一项为例做进一步分析:

$$\begin{aligned} \int (P_{ijs} + \Delta P_{ij}) d(\theta_{is} + \Delta \theta_i) = & \int (P_{ijs} + P_{ij,\lambda_1} + \dots + P_{ij,\lambda_k}) \cdot \\ d(\theta_{is} + \theta_{i,\lambda_1} + \dots + \theta_{i,\lambda_k}) = & \int (P_{ijs} + P_{ij,\lambda_1} + P_{ij,\lambda_2} + P_{ij,\lambda_{\text{else}}}) \cdot \\ d(\theta_{is} + \theta_{i,\lambda_1} + \theta_{i,\lambda_2} + \theta_{i,\lambda_{\text{else}}}) = & \int (P_{ijs} d\theta_{is} + P_{ijs} d\theta_{i,\lambda_1} + \\ P_{ijs} d\theta_{i,\lambda_2} + P_{ijs} d\theta_{i,\lambda_{\text{else}}}) + & \int (P_{ij,\lambda_1} d\theta_{is} + P_{ij,\lambda_1} d\theta_{i,\lambda_1} + \\ P_{ij,\lambda_1} d\theta_{i,\lambda_2} + P_{ij,\lambda_1} d\theta_{i,\lambda_{\text{else}}}) + & \int (P_{ij,\lambda_2} d\theta_{is} + P_{ij,\lambda_2} d\theta_{i,\lambda_1} + \\ P_{ij,\lambda_2} d\theta_{i,\lambda_2} + P_{ij,\lambda_2} d\theta_{i,\lambda_{\text{else}}}) + & \int (P_{ij,\lambda_{\text{else}}} d\theta_{is} + \\ P_{ij,\lambda_{\text{else}}} d\theta_{i,\lambda_1} + P_{ij,\lambda_{\text{else}}} d\theta_{i,\lambda_2} + & P_{ij,\lambda_{\text{else}}} d\theta_{i,\lambda_{\text{else}}}) \quad (9) \end{aligned}$$

式中: $P_{ij,\lambda_{\text{else}}}$ 为除 P_{ij,λ_1} 、 P_{ij,λ_2} 外的其余有功功率模

式振荡分量之和; $\theta_{i,\lambda_{\text{else}}}$ 为除 θ_{i,λ_1} 、 θ_{i,λ_2} 外的其余电压相角模式振荡分量之和。

设 λ_1 、 λ_2 两模式为系统遭受扰动后低频振荡中的两个主导振荡模式,则振荡量 ΔP_{ij} 中对应 λ_1 、 λ_2 两模式的分量将远大于对应于其他非主导振荡模式的分量,即 P_{ij,λ_1} 、 P_{ij,λ_2} 将远大于 $P_{ij,\lambda_3} \dots P_{ij,\lambda_k}$, 故存在: P_{ij,λ_1} 、 $P_{ij,\lambda_2} \gg P_{ij,\lambda_{\text{else}}}$; 又由于电网在受到小扰动时,系统电气量的稳态值将远大于振荡过程中的振荡量,故存在: $P_{ijs} \gg \Delta P_{ij}$, 综上存在: $P_{ijs} \gg P_{ij,\lambda_1}$ 、 $P_{ij,\lambda_2} \gg P_{ij,\lambda_{\text{else}}}$, 因此有以下不等式关系和等式关系:

$$\begin{cases} \left\{ \int P_{ijs} d\theta_{i,\lambda_1} \int P_{ijs} d\theta_{i,\lambda_2} \right\} \gg \\ \left\{ \int P_{ij,\lambda_1} d\theta_{i,\lambda_1} \int P_{ij,\lambda_1} d\theta_{i,\lambda_2} \int P_{ij,\lambda_2} d\theta_{i,\lambda_1} \int P_{ij,\lambda_2} d\theta_{i,\lambda_2} \int P_{ijs} d\theta_{i,\lambda_{\text{else}}} \right\} \gg \\ \left\{ \int P_{ij,\lambda_1} d\theta_{i,\lambda_{\text{else}}} \int P_{ij,\lambda_2} d\theta_{i,\lambda_{\text{else}}} \int P_{ij,\lambda_{\text{else}}} d\theta_{i,\lambda_1} \int P_{ij,\lambda_{\text{else}}} d\theta_{i,\lambda_2} \right\} \gg \\ \int P_{ij,\lambda_{\text{else}}} d\theta_{i,\lambda_{\text{else}}} \\ \int \begin{bmatrix} P_{ijs} \\ P_{ij,\lambda_1} \\ P_{ij,\lambda_2} \\ P_{ij,\lambda_{\text{else}}} \end{bmatrix} d\theta_{is} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

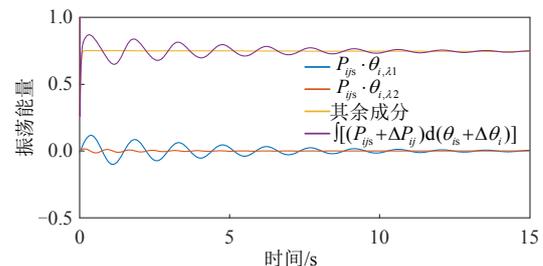
结合式(10)可将式(9)做进一步近似化简:

$$\begin{aligned} \int [(P_{ijs} + \Delta P_{ij}) d(\theta_{is} + \Delta \theta_i)] \approx & \int P_{ijs} d\theta_{i,\lambda_1} + \\ \int P_{ijs} d\theta_{i,\lambda_2} \approx & P_{ijs} \theta_{i,\lambda_1} + c_1 + P_{ijs} \theta_{i,\lambda_2} + c_2 \quad (11) \end{aligned}$$

式中 c_1 、 c_2 为常数

下文以四机两区系统中支路 10-11 上支路振荡能量展开式的第一项为例,对信号 $\int [(P_{ijs} + \Delta P_{ij}) \cdot d(\theta_{is} + \Delta \theta_i)]$ 和信号 $P_{ijs} \theta_{i,\lambda_1}$ 、 $P_{ijs} \theta_{i,\lambda_2}$ 进行时、频域分析以证明式(11)的正确性,其中模式 λ_1 的振荡频率为 0.68Hz,模式 λ_2 的振荡频率为 1.32Hz。

图 2(a)为时域图,可见 $P_{ijs} \theta_{i,\lambda_1}$ 、 $P_{ijs} \theta_{i,\lambda_2}$ 两信号的振荡幅度较大,其余信号成分为一常数,振荡幅度几乎为 0;图 2(b)为频域图,可见 $P_{ijs} \theta_{i,\lambda_1}$ 、 $P_{ijs} \theta_{i,\lambda_2}$ 两信号为各组成成分中的主导项,故可以近似忽略其余模式、模式倍频项与模式耦合项。



(a) 时域图

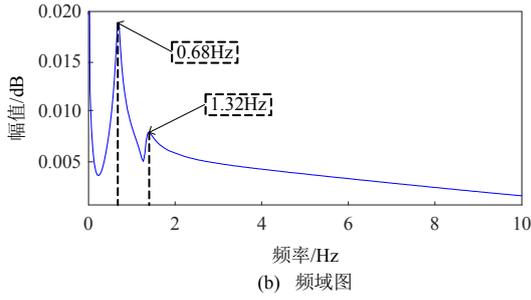


图 2 简化合理性验证

Fig. 2 Verification of simplification rationality

在对式(8)第一项进行解析和近似化简后,对其余 3 项做相同处理,可得:

$$E_{bij} \approx P_{ijs} \theta_{i,\lambda_1} + P_{ijs} \theta_{i,\lambda_2} + Q_{ijs} \ln V_{i,\lambda_1} + Q_{ijs} \ln V_{i,\lambda_2} + P_{jis} \theta_{j,\lambda_1} + P_{jis} \theta_{j,\lambda_2} + Q_{jis} \ln V_{j,\lambda_1} + Q_{jis} \ln V_{j,\lambda_2} + c_3 \quad (12)$$

式中 c_3 为常数。

至此,已通过支路振荡能量解析,将支路振荡能量进行近似化简,并证明化简的正确性。

2.2 支路模式振荡能量

式(12)为任意支路 $i-j$ 的支路振荡能量化简形式,可将其进一步化为

$$E_{bij} \approx P_{ijs} \theta_{i,\lambda_1} + P_{jis} \theta_{j,\lambda_1} + Q_{ijs} \ln V_{i,\lambda_1} + Q_{jis} \ln V_{j,\lambda_1} + P_{ijs} \theta_{i,\lambda_2} + P_{jis} \theta_{j,\lambda_2} + Q_{ijs} \ln V_{i,\lambda_2} + Q_{jis} \ln V_{j,\lambda_2} + c_3 \quad (13)$$

定义支路模式振荡能量以对应不同的振荡模式,具体的:将式(13)右侧前两项记为支路 $i-j$ 在模式 λ_1 下的支路模式振荡能量 E_{bij,λ_1} ;后两项记为支路 $i-j$ 在模式 λ_2 下的支路模式振荡能量 E_{bij,λ_2} ,进而式(13)可写为

$$E_{bij} \approx E_{bij,\lambda_1} + E_{bij,\lambda_2} + c_3 \quad (14)$$

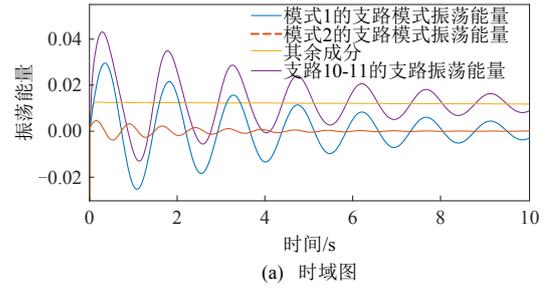
其中:

$$\begin{cases} E_{bij,\lambda_1} = P_{ijs} \theta_{i,\lambda_1} + P_{jis} \theta_{j,\lambda_1} + Q_{ijs} \ln V_{i,\lambda_1} + Q_{jis} \ln V_{j,\lambda_1} \\ E_{bij,\lambda_2} = P_{ijs} \theta_{i,\lambda_2} + P_{jis} \theta_{j,\lambda_2} + Q_{ijs} \ln V_{i,\lambda_2} + Q_{jis} \ln V_{j,\lambda_2} \end{cases}$$

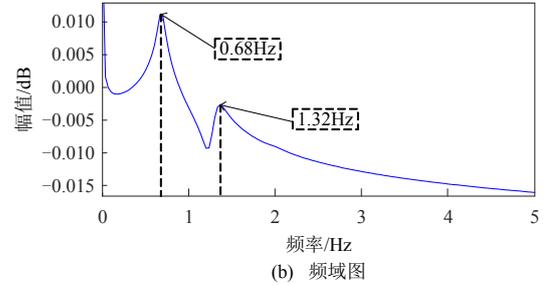
下文继续以四机两区系统中支路 10-11 为例,验证式(14)的正确性:

图 3(a)为时域图,可见 E_{bij,λ_1} 、 E_{bij,λ_2} 两项的振荡幅度较大,其余成分的振荡幅度几乎为 0;图 3(b)为频域图,可见 E_{bij,λ_1} 、 E_{bij,λ_2} 两项为组成成分中的主导项,故可以认为:任意支路的支路振荡能量都可近似看作几个主导振荡模式所对应支路模式振荡能量的加和。进而对于有 m 个主导振荡模式的低频振荡,有以下关系:

$$\begin{cases} E_B = \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{j=1}^{n_b} E_{bij} \\ E_{bij} = E_{bij,\lambda_1} + \dots + E_{bij,\lambda_k} + \dots + E_{bij,\lambda_m} + c_3 \end{cases} \quad (15)$$



(a) 时域图



(b) 频域图

图 3 支路 10-11 上 λ_1 、 λ_2 两模式的支路模式振荡能量

Fig. 3 Branch mode oscillation energy of mode1 and mode2 on branch 10-11

其中:

$$\begin{cases} E_{bij,\lambda_1} = P_{ijs} \theta_{i,\lambda_1} + P_{jis} \theta_{j,\lambda_1} + Q_{ijs} \ln V_{i,\lambda_1} + Q_{jis} \ln V_{j,\lambda_1} \\ \dots \\ E_{bij,\lambda_k} = P_{ijs} \theta_{i,\lambda_k} + P_{jis} \theta_{j,\lambda_k} + Q_{ijs} \ln V_{i,\lambda_k} + Q_{jis} \ln V_{j,\lambda_k} \\ \dots \\ E_{bij,\lambda_m} = P_{ijs} \theta_{i,\lambda_m} + P_{jis} \theta_{j,\lambda_m} + Q_{ijs} \ln V_{i,\lambda_m} + Q_{jis} \ln V_{j,\lambda_m} \end{cases}$$

式中 E_{bij,λ_k} 、 E_{bij,λ_m} 分别为支路 $i-j$ 在模式 λ_k 、 λ_m 下的支路模式振荡能量。

现将 E_{bij,λ_1} 记为

$$E_{bij,\lambda_1} = E_{bij,\lambda_1_P} + E_{bij,\lambda_1_Q} \quad (16)$$

$$\text{其中: } \begin{cases} E_{bij,\lambda_1_P} = P_{ijs} \theta_{i,\lambda_1} + P_{jis} \theta_{j,\lambda_1} \\ E_{bij,\lambda_1_Q} = Q_{ijs} \ln V_{i,\lambda_1} + Q_{jis} \ln V_{j,\lambda_1} \end{cases}$$

式中: E_{bij,λ_1_P} 为 λ_1 模式下支路 $i-j$ 的支路模式振荡能量的有功分量; E_{bij,λ_1_Q} 为 λ_1 模式下支路 $i-j$ 的支路模式振荡能量的无功分量。

设有功率由 i 节点流向 j 节点,支路的有功损耗为 ΔP_s ,存在 $P_{ijs} - \Delta P_s = -P_{jis}$,且 $\Delta P_s > 0$,则有:

$$E_{bij,\lambda_1_P} = P_{ijs} (\theta_{i,\lambda_1} - \theta_{j,\lambda_1}) + \Delta P_s \theta_{j,\lambda_1} \quad (17)$$

由式(17)可知,线路 $i-j$ 的有功功率稳态值 P_{ijs} 越大,则模式 λ_1 对应的支路模式振荡能量也越大,可见重载线路发生低频振荡时所需的平息时间更长;另一方面,由于 ΔP_s 是因支路上的电阻 R_{ij} 引起的,而无论是线路支路还是变压器支路,其上的电阻 R_{ij} 都很小,存在: $\Delta P_s \approx 0$, $P_{ijs} \gg \Delta P_s$,故当忽略支路电阻时认为:

$$E_{bij,\lambda_1_P} = P_{ijs} \theta_{ij,\lambda_1} \quad (18)$$

系统在实际发生振荡后,可以通过降低重负荷输电线路上的传输功率^[24],即减小动态潮流中有功功率稳态值 P_{ijs} ,加快振荡平息。

设无功功率由 i 节点流向 j 节点,线路上的无功损耗为 ΔQ_s ,则存在 $Q_{ijs}-\Delta Q_s=-Q_{jis}$,且 $\Delta Q_s>0$,则有:

$$E_{bij,\lambda_1 Q} = Q_{ijs}(\ln V_{i,\lambda_1} - \ln V_{j,\lambda_1}) + \Delta Q_s \ln V_{j,\lambda_1} \quad (19)$$

由式(19)可知,若线路 $i-j$ 的稳态无功损耗 ΔQ_s 越大,则模式 λ_1 对应的支路模式振荡能量也越大,而无功损耗是由于支路上的电感 X_{ij} 引起的,线路越长,其电抗越大,对应无功损耗也会越大,可见长线路发生低频振荡时所需平息时间更长。实际工程中可通过串联补偿电容,或减少送、受端的电气距离的方法^[24],使动态潮流中无功损耗稳态值 ΔQ_s 减小,加快振荡平息。

2.3 多模式下支路模式振荡能量提取方法

由于电力系统在实际运行过程中多工况、强时变的特性,动态潮流中的有功功率、无功功率稳态值往往难以确定^[25],进而导致实际中支路上各主导模式对应的支路模式振荡能量 $E_{bij,\lambda k}$ 无法通过式(15)计算获得,但可以采用信号分解的方法直接在支路振荡能量 E_{bij} 中获取支路模式振荡能量 $E_{bij,\lambda k}$ 。下文以式(14)为例,作进一步说明。

由于组成支路模式振荡能量 E_{bij,λ_1} 的信号 $P_{ijs}\theta_{i,\lambda_1}$ 、 $P_{jis}\theta_{j,\lambda_1}$ 与 θ_{i,λ_1} 、 θ_{j,λ_1} 具有相同的频率,信号 $Q_{ijs}\ln V_{i,\lambda_1}$ 、 $Q_{jis}\ln V_{j,\lambda_1}$ 与 $\ln V_{i,\lambda_1}$ 、 $\ln V_{j,\lambda_1}$ 具有相同的频率,且都与模式 λ_1 的振荡频率对应,故在实际中可以将与模式 λ_1 对应频率相同的信号提取出来,即为模式 λ_1 对应的支路模式振荡能量(对于模式 λ_2 同理),从而避免了因潮流稳态值准确性不高而产生的问题。同时由于上文已证明了近似化简的正确性,故基于信号频率分解的支路模式振荡能量获取方法也可保证准确性。另一方面,相比于此前通过计算耗散能量进行的振荡类型判别,本文提出的支路模式振荡能量不需要计算各电气量的变化量,可以大量简化在线应用时的程序,减小所需的数据存储空间,提高效率。

下文以四机两区系统中支路10-11上振荡频率0.68Hz对应的支路模式振荡能量为例,进行验证与说明。

如图4,基于信号频率分解提取的 E_{bij,λ_1} 信号与通过式(14)计算获得的 E_{bij,λ_1} 信号几乎完全重合,证明支路振荡能量解析中的其他组成项不会影响对

支路模式振荡能量信号提取时的准确性。

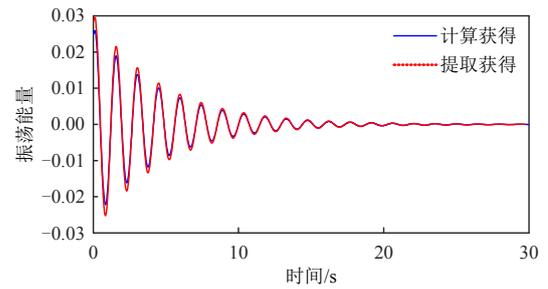


图4 信号提取方法的正确性验证

Fig. 4 Correctness verification of signal extraction method

将振荡模式 λ_k 下网络中各支路的支路模式振荡能量加和,定义为模式 λ_k 的网络模式振荡能量,进而流入网络部分的振荡总能量应为各模式的网络模式振荡能量加和,存在式(20)关系,本文中振荡能量相关的定义如图5所示。

$$\begin{cases} E_B = \sum E_{B,\lambda k} + c_4 \\ E_{B,\lambda k} = \sum_{i=1}^{n_B} \sum_{j=1}^{n_B} E_{bij,\lambda k} \\ E_{bij,\lambda k} = P_{ijs}\theta_{i,\lambda k} + P_{jis}\theta_{j,\lambda k} + Q_{ijs}\ln V_{i,\lambda k} + Q_{jis}\ln V_{j,\lambda k} \end{cases} \quad (20)$$

式中: c_4 为常数; $E_{B,\lambda k}$ 为对应 λ_k 模式的网络支路模式振荡总能量。

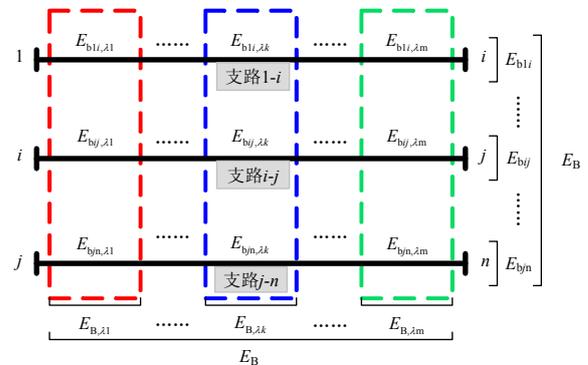


图5 本文相关支路能量定义关联示意图

Fig. 5 Correlation diagram of related branch energy definition in this paper

3 支路模式振荡能量与特征值分析的联系

3.1 支路模式振荡能量与系统模式状态变量的联系

系统非线性微分代数方程在平衡点线性化可表示^[26]为

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中: $\Delta X = [\Delta x_{\delta_1}, \Delta x_{\omega_1}, \Delta x_{\text{else}_1}, \dots, \Delta x_{\delta_n}, \Delta x_{\omega_n}, \Delta x_{\text{else}_n}]^T$ 。
 $\Delta V_n = [\Delta v_1, \Delta \theta_1, \dots, \Delta v_n, \Delta \theta_n]^T$ 。

式中: Δx_{δ} 为转子角度状态变量; Δx_{ω} 为转子转速状

态变量； Δx_{else} 为系统其他状态变量； Δv 为节点电压幅值增量； $\Delta \theta$ 为节点电压角度增量； A 、 B 、 C 、 D 为系数矩阵。

由式(21)可得：

$$\Delta V_n(t) = -D^{-1}C\Delta X(t) \quad (22)$$

进而，在振荡模式 λ_k 下有：

$$\Delta V_{n,\lambda k}(t) = -D^{-1}C\Delta X_{\lambda k}(t) \quad (23)$$

式中： $\Delta V_{n,\lambda k}(t)$ 为振荡模式 λ_k 下的网络电压模式增量列向量，由网络电压幅值、相角的模式振荡分量组成； $\Delta X_{\lambda k}(t)$ 为振荡模式 λ_k 下的系统模式状态变量，即系统状态变量中对应模式 λ_k 的分量。

将式(23)结合式(15)可得：

$$E_{bij,\lambda k} = P_{ijs}\Delta V_{i,\lambda k} + P_{jis}\Delta V_{j,\lambda k} + Q_{ijs}\ln\Delta V_{i,\lambda k} + Q_{jis}\ln\Delta V_{j,\lambda k} \quad (24)$$

$$\text{其中：} \begin{cases} \Delta V_{i,\lambda k} = [-D^{-1}C\Delta X_{\lambda k}(t)]_{i \times 1} \\ \Delta V_{i',\lambda k} = [-D^{-1}C\Delta X_{\lambda k}(t)]_{i' \times 1} \\ \Delta V_{j,\lambda k} = [-D^{-1}C\Delta X_{\lambda k}(t)]_{j \times 1} \\ \Delta V_{j',\lambda k} = [-D^{-1}C\Delta X_{\lambda k}(t)]_{j' \times 1} \end{cases}$$

式中： $\Delta V_{i,\lambda k}$ 为网络电压模式增量列向量中的第 i 行元素，即 i 节点的电压幅值模式振荡分量； $\Delta V_{i',\lambda k}$ 为电压模式增量列向量中的第 i' 行元素，即 i 节点的电压相角模式振荡分量； $\Delta V_{j,\lambda k}$ 与 $\Delta V_{j',\lambda k}$ 同理。

由式(24)建立起了系统模式状态变量与支路模式振荡能量之间的关系，由此说明可以通过支路模式振荡能量 $E_{bij,\lambda k}$ 反映对应模式下系统的振荡状况。

3.2 支路模式振荡能量与发电机转速状态变量模式可观性的联系

在小干扰稳定的条件下，系统状态方程解的一般形式为

$$\Delta x(t) = \sum_{k=1}^m c_k e^{\lambda_k t} P_k \quad (25)$$

式中： $c_k = \Psi_k^T \Delta x(t_0)$ ； $\Delta x(t)$ 为系统状态变量； Ψ_k 、 P_k 分别为模式 λ_k 对应的左、右特征向量。

故第 i 台发电机在振荡模式 λ_k 下的转速模式振荡分量可表示^[26]为

$$\Delta \omega_{i,\lambda k}(t) = c_k e^{\lambda_k t} P_{ik} + \hat{c}_k e^{\hat{\lambda}_k t} \hat{P}_{ik} \quad (26)$$

式中： $\Delta \omega_{i,\lambda k}$ 为第 i 台发电机在振荡模式 λ_k 下的转速模式振荡分量； P_{ik} 为 P_k 中第 i 台发电机转速项对应的元素； $\hat{\lambda}_k$ 为与 λ_k 对应的共轭特征值。

再结合机电振荡模式下转速模式振荡分量与

发电机有功功率模式振荡分量之间的关系：

$$\Delta P_{ei,\lambda k} = -M_i \dot{\lambda}_k \Delta \omega_{i,\lambda k} \quad (27)$$

式中： $\dot{\lambda}_k = \sigma_k + j\omega_k$ ； $\Delta P_{ei,\lambda k}$ 为第 i 台发电机在振荡模式 λ_k 下的有功功率模式振荡分量； M_i 为第 i 台发电机的惯性时间常数。

进而将式(26)代入式(27)可得：

$$\Delta P_{ei,\lambda k} = -M_i \dot{\lambda}_k (c_k e^{\lambda_k t} P_{ik} + \hat{c}_k e^{\hat{\lambda}_k t} \hat{P}_{ik}) \quad (28)$$

又已知潮流有功功率方程为

$$P_{ij} = V_i V_j \left(\frac{\cos \theta_{ij}}{R_{ij}} + \frac{\sin \theta_{ij}}{X_{ij}} \right) \quad (29)$$

对于传输线和变压器支路可忽略其支路电阻，并在平衡点线性化后可得：

$$\Delta P_{ij} = \frac{V_{js}\Delta V_i}{X_{ij}} \sin \theta_{ijs} + \frac{V_{is}\Delta V_j}{X_{ij}} \sin \theta_{ijs} + \frac{V_{is}V_{js}\Delta \theta_{ij}}{X_{ij}} \cos \theta_{ijs} \quad (30)$$

由于网络中支路两端电压相角差不大，故将近似条件： $\sin \theta_{ijs} \approx 0$ 、 $\cos \theta_{ijs} \approx 1$ 代入式(30)可得：

$$\Delta P_{ij} = \frac{V_{is}V_{js}\Delta \theta_{ij}}{X_{ij}} \quad (31)$$

进而，在振荡模式 λ_k 下，有功功率的模式振荡分量可表示为

$$\Delta P_{ij,\lambda k} = \frac{V_{is}V_{js}\Delta \theta_{ij,\lambda k}}{X_{ij}} \quad (32)$$

对于网络中的任意支路，其两端点电压幅值的稳态值和该支路的电抗是确定的，故在确定模式下，支路两端相角差的模式振荡分量与该支路上传输的有功功率模式振荡分量之间存在着式(32)的线性关系。

将式(28)代入式(32)可得：

$$\Delta \theta_{ei,\lambda k} = m_1 P_{ik} + m_2 \hat{P}_{ik} \quad (33)$$

其中：

$$\begin{cases} m_1 = \frac{-M_i \dot{\lambda}_k X_{ij} c_k e^{\lambda_k t}}{V_{is} V_{js}} \\ m_2 = \frac{-M_i \dot{\lambda}_k X_{ij} \hat{c}_k e^{\hat{\lambda}_k t}}{V_{is} V_{js}} \end{cases}$$

分析式(33)，在确定的振荡模式 λ_k 下， m_1 、 m_2 都为常数，而 P_k 中元素 P_{ik} 表示在发电机转速状态量 ω_i 上观察 λ_k 模式的相对幅值及相位，即 ω_i 对模式 λ_k 的可观性越强，其对应的 P_{ik} 就越大，相应的该

发电机出口处支路电压相角差的模式振荡分量 $\Delta\theta_{ei,\lambda k}$ 就越大, 结合(15)、(18)式可得: 对于确定模式具有强可观性转速状态变量的发电机, 其出口处支路的支路模式振荡能量也大。

下文以四机两区系统为例, 分别在振荡频率为 0.68Hz 和 1.32Hz 的模式下进行验证。

模式 λ_1 的振荡频率为 0.68Hz, 各发电机转速状态变量对此模式的可观性如表 1 所示, 由大到小依次为 G3、G4、G1、G2。

表 1 各发电机转速状态变量对模式 1(0.68Hz)的可见性
Table 1 Observability of each generator speed state variable to model 1 (0.68Hz)

发电机	转速状态变量对本模式的可见性幅值
G1	0.001589608
G2	0.000840424
G3	0.012067397
G4	0.011108299

模式 λ_2 的振荡频率为 1.32Hz, 各发电机转速状态变量对此模式的可见性如表 2 所示, 由大到小依次为 G4、G3、G1、G2。

表 2 各发电机转速状态变量对模式 2(1.32Hz)的可见性
Table 2 Observability of each generator speed state variable to mode2 (1.32Hz)

发电机	转速状态变量对本模式的可见性幅值
G1	0.000676841
G2	0.000130381
G3	0.010792411
G4	0.015747462

模式 λ_1 下各发电机出口支路的支路模式振荡能量如图 6(a)所示, 由大到小依次为: $E_{bG3,\lambda 1} > E_{bG4,\lambda 1} > E_{bG1,\lambda 1} > E_{bG2,\lambda 1}$; 模式 λ_2 下各发电机出口支路的支路模式振荡能量如图 6(b)所示, 由大到小依次为: $E_{bG4,\lambda 2} > E_{bG3,\lambda 2} > E_{bG1,\lambda 2} > E_{bG2,\lambda 2}$ 。

由式(28)可知, 对于确定模式, 发电机转速状态变量对该模式的模式可观性越强, 其出口的有功功率模式振荡分量 $\Delta P_{ei,\lambda k}$ 便越大, 进而该发电机附近支路上传输的有功功率模式振荡分量 $\Delta P_{ij,\lambda k}$ 就会越大, 结合式(32)可知, 这些支路两端点电压相角

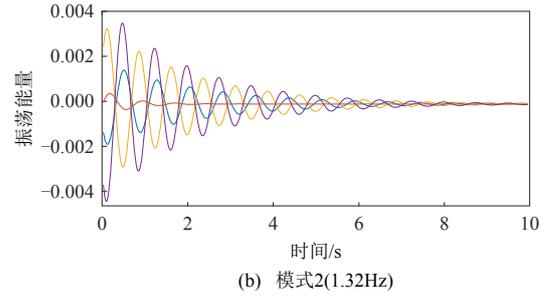
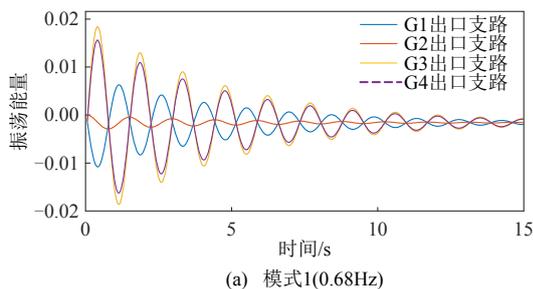


图 6 各发电机出口支路的支路模式振荡能量
Fig. 6 Branch mode oscillation energy of each generator outlet branch

差的模式振荡分量 $\Delta\theta_{ij,\lambda k}$ 也越大。再结合式(15)、(18)可得, 对于确定模式具有越强可观性转速状态变量的发电机, 其附近支路上分担的支路模式振荡能量也越大。

综上可知, 系统发生低频振荡时在确定模式下, 对此模式具有越强可观性转速状态变量的发电机, 其出口支路与附近支路上的支路模式振荡能量也越大。

4 基于支路模式振荡能量的低频振荡区域定位方法

已在第 3 节证明了支路模式振荡能量 $E_{bij,\lambda k}$ 的有效性, 进一步将其最大值与最小值之差定义为支路模式振荡能量分担度以衡量振荡剧烈程度, 记为 $M_{bij,\lambda k}$, 并提出基于支路模式振荡能量分担度的低频振荡区域定位方法, 如图 7 所示。具体步骤如下:

步骤 1: 利用 WAMS 采集网络中各支路的电气量信号: 有功传输功率 P_{ij} 、 P_{ji} 、无功传输功率 Q_{ij} 、 Q_{ji} 、端节点电压幅值 V_i 、 V_j 、端节点电压相角 θ_i 、

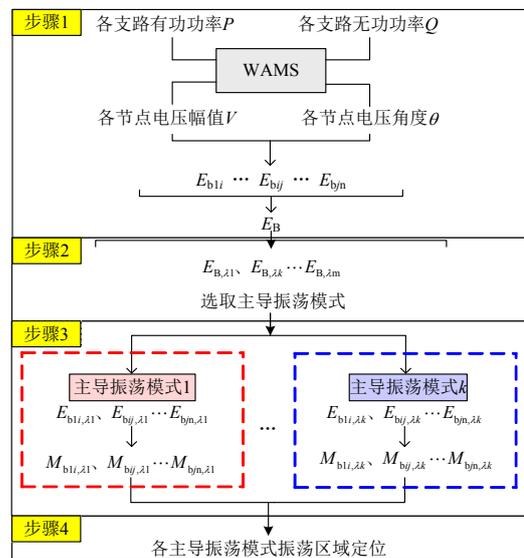


图 7 方法流程图

Fig. 7 Method flow chart

θ_j , 通过式(6)计算全网各支路的支路振荡能量 E_{bij} , 加和后得到网络中的支路振荡总能量 E_B 。

步骤 2: 对网络中的支路振荡总能量 E_B 进行信号分解并对各模式对应的网络模式振荡能量 $E_{B,\lambda k}$ 进行由大到小排序, 选取所关心的的模式作为主导振荡模式(通常为 $E_{B,\lambda k}$ 较大的几个模式)。

步骤 3: 对全网络各支路的支路振荡能量进行信号分解, 提取与步骤 2 中确定的主导振荡模式频率相同的分量作为各主导振荡模式下的支路模式振荡能量 $E_{bij,\lambda k}$, 并进一步计算支路模式振荡能量分担度 $M_{bij,\lambda k}$ 。

步骤 4: 以各支路为起始支路遍历全网络, 形成包含支路数最少的割集, 在步骤 2 确定的各模式下, 根据各割集所包含支路的支路模式振荡能量分担度之和排序, 其值越大表示该割集参与振荡越剧烈, 进而对网络中的振荡区域进行定位。

需要进行说明的是, 在步骤 2 中利用 WAMS 采集网络中各支路的电气量时, 数据获取的起始时刻应在避免扰动冲击影响的前提下尽可能早, 另一方面由于低频振荡的振荡频率范围为 0.1~2.5Hz, 故数据选取的时间窗口应不小于 10s, 以避免重要的支路信息丢失, 保证方法的准确性。

5 算例分析

为了验证本文所提出理论的正确性和方法的有效性, 分别在四机两区系统和 IEEE10 机 39 节点系统中进行仿真验证。

5.1 四机两区系统

在四机两区系统中线路 10-11 上施加扰动时间为 0.01s 的三相短路, 系统发生低频振荡, 如图 8 所示。

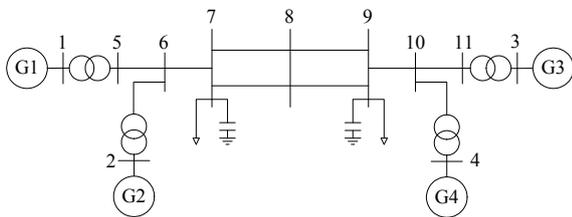


图 8 四机两区系统图

Fig. 8 Four-machine two-area system diagram

先计算出网络中的支路振荡总能量 E_B , 再通过比较信号分解后各模式对应的网络模式振荡能量 $E_{B,\lambda k}$ 选取主导振荡模式。

由图 9 可见, 振荡频率 0.68Hz 和振荡频率 1.32Hz 对应模式的网络模式振荡能量 $E_{B,\lambda k}$ 较大,

故可将这两个模式确定为主导振荡模式。

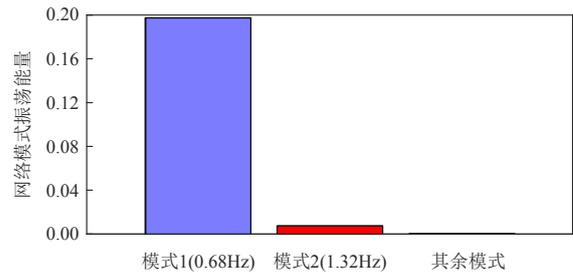
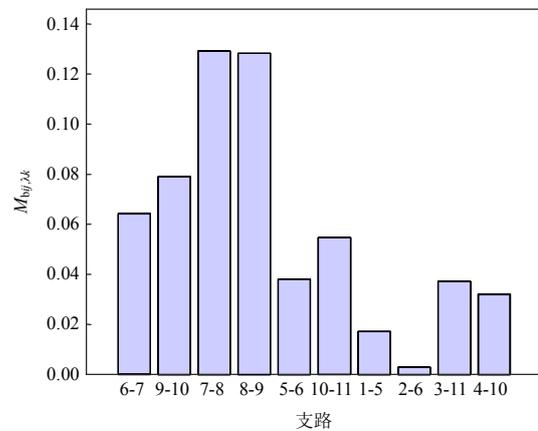


图 9 网络模式振荡能量对比图

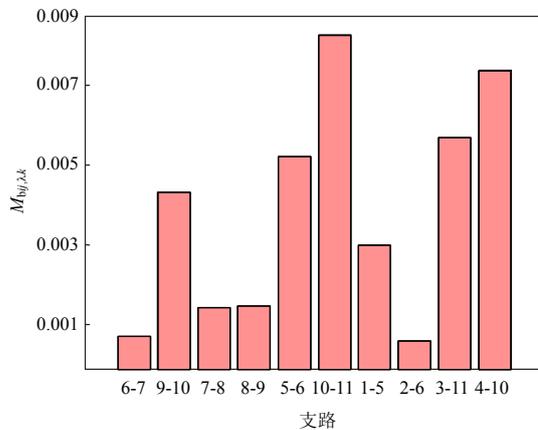
Fig. 9 Comparison chart of network mode oscillation energy

图 10 分别为在 0.68 和 1.32Hz 对应模式下, 全系统各支路的支路模式振荡能量分担度 $M_{bij,\lambda k}$ 对比图。由图 10(a)可见在振荡频率为 0.68Hz 对应的模式下, 支路 7-8 和支路 8-9 对应的支路模式振荡能量分担度 $M_{bij,\lambda k}$ 较大; 由图 10(b)可见在振荡频率为 1.32Hz 对应的模式下, 支路 10-11、支路 4-10 对应的支路模式振荡能量分担度 $M_{bij,\lambda k}$ 较大, 在遍历网络形成各割集后, 低频振荡区域定位如图 11 所示。

由图 11(a)可见, 模式 1 定位的低频振荡区域在左右两区域, 实际中应考虑降低割集 1、2 中所包



(a) 模式 1(0.68Hz)



(b) 模式 2(1.32Hz)

图 10 支路模式振荡能量分担度对比图

Fig. 10 Comparison chart of $M_{bij,\lambda k}$

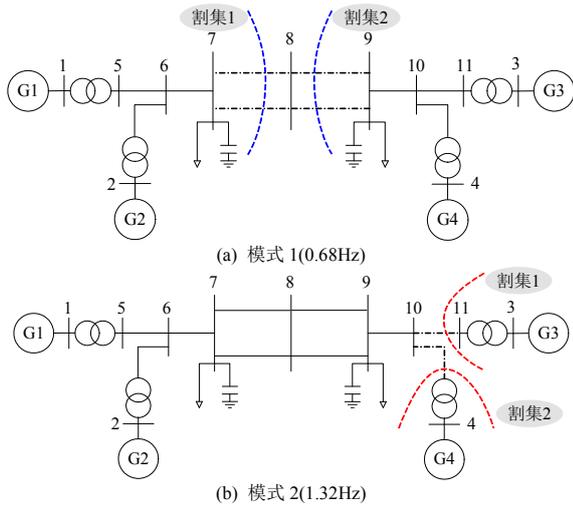


图 11 振荡区域定位示意图

Fig. 11 Schematic diagram of oscillating region positioning

含支路上的有功功率，即降低联络线上流过的有功功率；由图 11(b)可见，模式 2 定位的低频振荡区域为右侧区域，实际中应考虑降低割集 1、2 中所包含支路上的有功功率，即降低发电机有功出力。与传统的模态分析对比，绘制各发电机转速右特征向量的极坐标系分布图如图 12 所示。

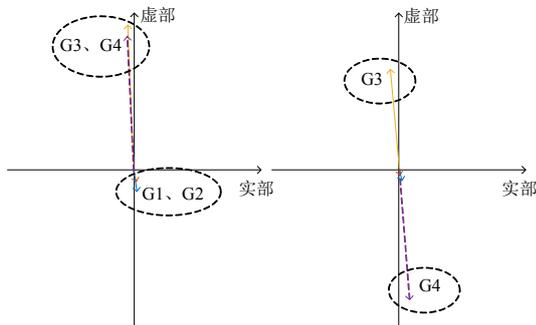


图 12 各发电机转速右特征向量分布图

Fig. 12 Distribution diagram of speed right eigenvector of each generator

图 12 中，左图为振荡频率 0.68Hz 对应的振荡模式，可见发电机 G3、G4 与发电机 G1、G2 之间的相对摆动较大；右图为振荡频率 1.32Hz 对应的振荡模式，可见发电机 G3 与发电机 G4 之间的相对摆动较大，但此模态分析结果仅能区分出相对振荡的机组，并不能准确定位网络中的关键支路，应用本文所提出的方法不仅能准确判断振荡类型与相对振荡机群，也能准确定位网络中分担振荡能量较大的元件，为振荡的抑制提供了依据。

5.2 IEEE10 机 39 节点系统

在 10 机 39 节点系统中线路 16-24 上施加扰动时间为 0.01s 的三相短路，系统发生低频振荡，如图 13 所示。

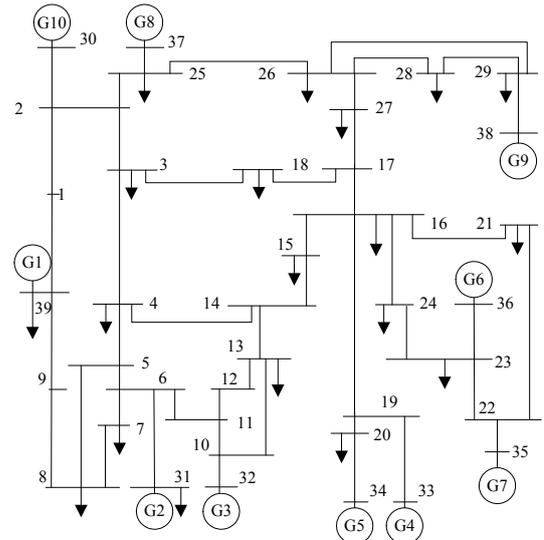


图 13 10 机 39 节点系统图

Fig. 13 10-machine 39-bus system diagram

先计算出网络中的支路振荡总能量 E_B ，再通过比较信号分解后各振荡模式对应的网络模式振荡能量 $E_{B, \lambda k}$ ，选取主导振荡模式。

由图 14 可见，振荡频率 0.63Hz、振荡频率 1.18Hz 和振荡频率 0.27Hz 对应模式的 $E_{B, \lambda k}$ 较大，故可将这 3 个模式确定为主导振荡模式。

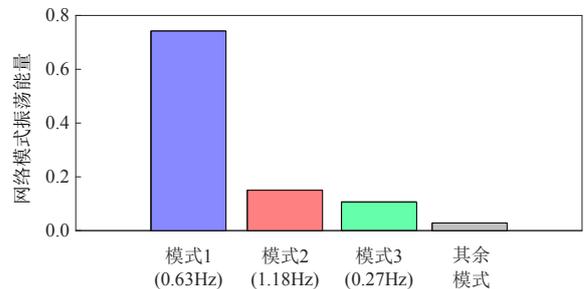
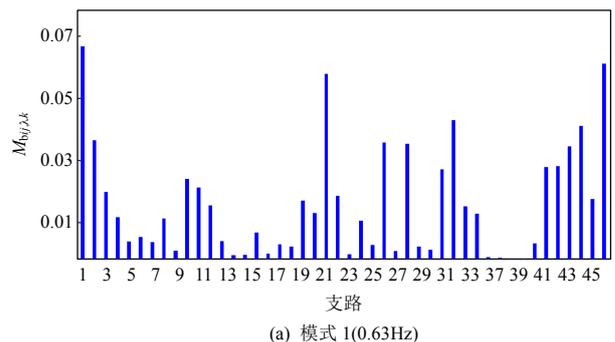


图 14 网络模式振荡能量对比图

Fig. 14 Comparison chart of network mode oscillation energy

图 15 分别为在 3 个模式下全系统各支路的支路模式振荡能量分担度 $M_{bij, \lambda k}$ 对比图，在遍历网络形成各割集后，各模式的低频振荡区域定位如图 16 所示。

下文以模式 1(区间振荡模式)和模式 2(局部振荡模式)为例进行模态分析，并绘制发电机转速右特



(a) 模式 1(0.63Hz)

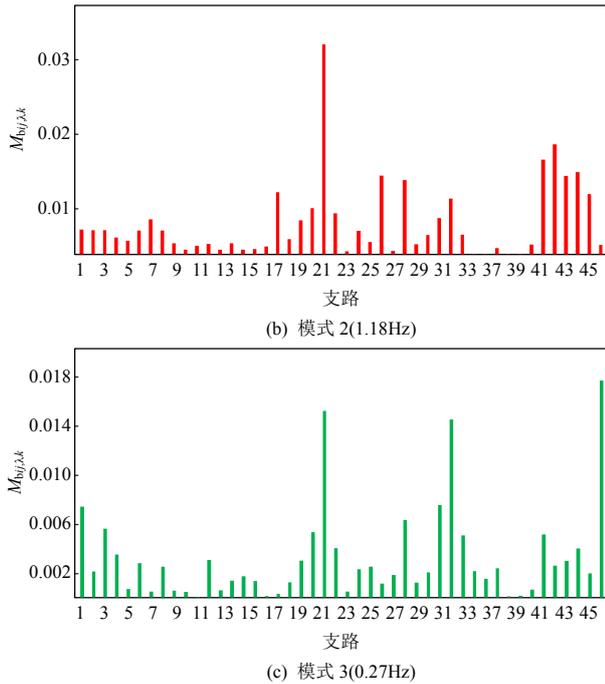


图 15 支路模式振荡能量分担度对比图

Fig. 15 Comparison chart of $M_{bij,\lambda k}$

征向量的极坐标系分布图如图 17 所示。

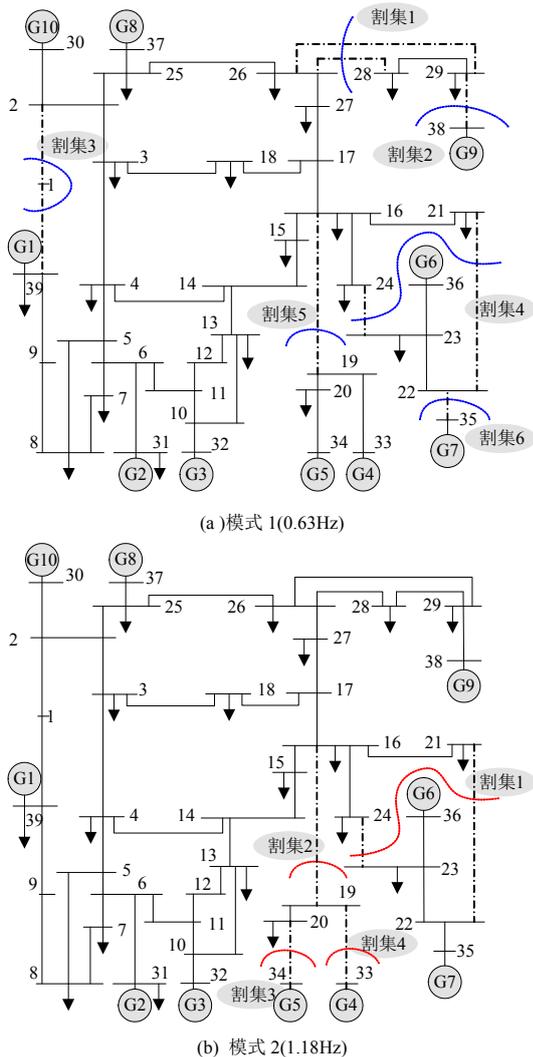


图 16 振荡区域定位示意图

Fig. 16 Schematic diagram of oscillating region positioning

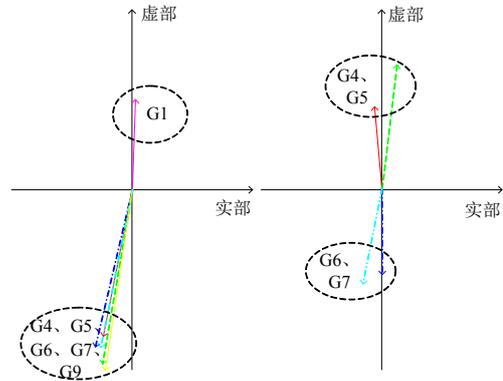


图 17 各发电机转速右特征向量分布图

Fig. 17 Distribution diagram of speed right eigenvector of each generator

图 17 中，左图为振荡频率 0.63Hz 对应的振荡模式，可见发电机 G1 与发电机 G4、G5、G6、G7、G9 之间的相对摆动较大，故振荡为区间振荡；右图为振荡频率 1.18Hz 对应的振荡模式，可见发电机 G4、G5 与发电机 G6、G7 之间的相对摆动较大，故振荡为局部振荡，可见对于多机大系统，本方法也能准确定位不同模式下的振荡区域，因此实际中可结合网络中的关键割集对振荡进行抑制。

6 结论

本文提出一种低频振荡区域定位的方法。首先，推导了系统的振荡能量守恒。然后，定义了支路振荡能量以反映系统在发生低频振荡时的振荡情况。在对其进行能量解析与化简后，定义了支路模式振荡能量，以反映振荡过程中各主导模式下的振荡情况。其次，定义支路模式振荡能量分担度，以此为指标进行各主导振荡模式的振荡区域定位，

并在四机两区系统和10机39节点系统中进行仿真验证,得到如下结论:

1) 系统因遭受小扰动发生低频振荡时,流入网络各元件的振荡能量也都是振荡的,发电机部分和负荷部分振荡能量的交互将通过网络中的各支路进行,但交互过程中三者之和所代表的由扰动注入系统的总能量始终是守恒的,满足能量守恒定律。

2) 支路模式振荡能量既能通过支路电气量反映该支路的振荡情况,又结合了系统稳态潮流信息,可反映该模式的振荡动态,在实际工程应用中易于获取,且避免了由于稳态值难以确定而导致的准确性问题。

3) 说明了支路模式振荡能量与特征值分析的联系,结合系统右特征向量,证明了对确定模式有强可观性转速状态变量的发电机,其出口处支路对应的支路模式振荡能量大,其附近支路上的支路模式振荡能量也大。

4) 本文提出的方法可在线定位不同模式下参与振荡的区域。与此前基于耗散能量进行振荡类型判别的方法相比,本文提出的方法不需要计算各电气量的变化量,更适合于结合WAMS的在线低频振荡类型判别及振荡区域定位应用。

后续可以在含高比例构网型新能源的系统中对本文提出的方法做进一步完善。

参考文献

- [1] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475(in Chinese).
- [2] 王铁强,贺仁睦,王卫国,等.电力系统低频振荡机理的研究[J].中国电机工程学报,2002,22(2):21-25.
WANG Tieqiang, HE Renmu, WANG Weiguo, et al. The mechanism study of low frequency oscillation in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 21-25(in Chinese).
- [3] KOSTEREV D N, TAYLOR C W, MITTELSTADT W A. Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [4] 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(in Chinese).
- [5] 李丹,苏为民,张晶,等.“9·1”内蒙古西部电网振荡的仿真研究[J].电网技术,2006,30(6):41-47.
LI Dan, SU Weimin, ZHANG Jing, et al. Simulation study on west inner Mongolia power grid oscillations occurred on September 1st, 2005[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 41-47(in Chinese).
- [6] 张剑云,李明节,周济,等.三峡巨型电站异常功率波动仿真与试验研究[J].中国电机工程学报,2012,32(16):122-129.
ZHANG Jianyun, LI Mingjie, ZHOU Ji, et al. Simulation and experiment research on the abnormal power fluctuation of the three gorges hydropower station[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 122-129(in Chinese).
- [7] 鲍颜红,徐伟,徐泰山,等.基于机组出力调整的小干扰稳定辅助决策计算[J].电力系统自动化,2011,35(3):88-91.
BAO Yanhong, XU We, XU Taishan, et al. Small-signal stability auxiliary decision-making calculation based on power generation adjustment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 88-91(in Chinese).
- [8] 徐伟,鲍颜红,徐泰山,等.电力系统低频振荡实时控制[J].电力自动化设备,2012,32(5):98-101.
XU Wei, BAO Yanhong, XU Taishan, et al. Real-time control of power system low-frequency oscillation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 98-101(in Chinese).
- [9] 温柏坚,汪芳宗.基于振荡分群辨识的低频振荡控制方法[J].电力系统自动化,2016,40(10):110-115,147.
WEN Bojian, WANG Fangzong. Operational control method for low frequency oscillation based on oscillation cluster identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 110-115, 147(in Chinese).
- [10] 陈磊,闵勇,胡伟.基于振荡能量的低频振荡分析与振荡源定位(一)理论基础与能量流计算[J].电力系统自动化,2012,36(3):22-27,86.
CHEN Lei, MIN Yong, HU Wei. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location based on oscillation energy part one mathematical foundation and energy flow computation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 22-27, 86(in Chinese).
- [11] 陈磊,陈亦平,闵勇,等.基于振荡能量的低频振荡分析与振荡源定位(二)振荡源定位方法与算例[J].电力系统自动化,2012,36(4):1-5,27.
CHEN Lei, CHEN Yiping, MIN Yong, et al. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location based on oscillation energy part two method for oscillation source location and case studies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 1-5, 27(in Chinese).

- [12] 李文锋, 郭剑波, 李莹, 等. 基于 WAMS 的电力系统功率振荡分析与振荡源定位(1)割集能量法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 41-46.
LI Wenfeng, GUO Jianbo, LI Ying, et al. Power system oscillation analysis and oscillation source location based on WAMS Part 1: method of cutset energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 41-46(in Chinese).
- [13] CHEN Lei, MIN Yong, CHEN Yiping, et al. Evaluation of generator damping using oscillation energy dissipation and the connection with modal analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1393-1402.
- [14] SUN Zhenglong, CAI Guowei, YANG Deyou, et al. A method for the evaluation of generator damping during low-frequency oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 109-119.
- [15] 孙正龙, 姜权峰, 王嘉琛, 等. 含风电电力系统机电振荡局部阻尼评估方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3452-3462.
SUN Zhenglong, JIANG Quanfeng, WANG Jiachen, et al. Evaluation method of local damping of electromechanical oscillation of power systems containing wind turbines[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3452-3462(in Chinese).
- [16] 代贤忠, 沈沉. 基于端口供给能量分解的电力系统振荡类型区分方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 40-45.
DAI Xianzhong, SHEN Chen. A power system oscillation property identifying method based on decomposition of energy supply on port[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 40-45(in Chinese).
- [17] 张晓航, 张文朝, 奚江惠, 等. 基于能量时空分布熵的低频振荡类型判别方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 84-90.
ZHANG Xiaohang, ZHANG Wenchao, XI Jianghui, et al. Discrimination method for low-frequency oscillation type based on entropy of energy distribution in space and time[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 84-90(in Chinese).
- [18] 蔡国伟, 穆钢, CHAN K W, 等. 基于网络信息的暂态稳定性定量分析——支路势能法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 1-6.
CAI Guowei, MU Gang, CHAN K W, et al. Branch potential energy method for power system transient stability assessment based on network dynamic variables [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 1-6(in Chinese).
- [19] 蔡国伟, 穆钢, 柳焯, 等. 定义于输出轨迹的网络暂态能量函数[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(9): 28-32.
CAI Guowei, MU Gang, LIU Chao, et al. Network transient energy function defined on output trajectory [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(9): 28-32(in Chinese).
- [20] 刘铖, 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(in Chinese).
- [21] YU Yiping, GRIJALVA S, THOMAS J J, et al. Oscillation energy analysis of inter-area low-frequency oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1195-1203.
- [22] 闵勇, 陈磊. 包含感应电动机模型的电力系统暂态能量函数[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2007, 37(9): 1117-1125.
MIN Yong, CHEN Lei. A transient energy function for power systems including the induction motor model [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2007, 50(5): 575-584(in Chinese).
- [23] 杨德昌, REHTANZ C, 李勇, 等. 利用改进数位演算法和经验模态分解的电力系统低频振荡信号瞬时参数的提取[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 63-68.
YANG Dechang, REHTANZ C, LI Yong, et al. An improved prototype algorithm based on empirical mode decomposition and its application in extracting instantaneous parameters of low frequency oscillation [J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 63-68(in Chinese).
- [24] 宋墩文, 杨学涛, 丁巧林, 等. 大规模互联网低频振荡分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 22-28.
SONG Dunwen, YANG Xuetao, DING Qiaolin, et al. A survey on analysis on low frequency oscillation in large-scale interconnected power grid and its control measures[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 22-28(in Chinese).
- [25] MASLENNIKOV S, WANG Bin, LITVINOV E. Dissipating energy flow method for locating the source of sustained oscillations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 88: 55-62.
- [26] 王青, 闵勇, 张毅威. 低频振荡的功率振荡增量分布计算新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 1-4, 40.
WANG Qing, MIN Yong, ZHANG Yiwei. A new algorithm of oscillatory active power increment distribution in low frequency oscillation study [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 1-4, 40(in Chinese).



孙正龙

在线出版日期: 2022-11-30.

收稿日期: 2022-04-18.

作者简介:

孙正龙(1988), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源电力系统稳定与控制、电力信息物理系统, nedusunzl@neepu.edu.cn.

(编辑 乔宝榆, 李新洁)