# 基于能量函数的低频振荡新型预警指标

宫 璇,刘涤尘,董 超,廖清芬,王 波,洪 敏 (武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要:提出可用于实际分析的断面潮流分析模型,通过选择观测断面,将对全网的分析转化为对每个观测断面的分析,从而实现全网的分散解耦分析。在该模型的基础上,简化了基于惯性中心的传统能量函数,对传统的稳定裕度指标进行改进,提出了稳定裕度增量指标,该指标建立于电力系统联络线观测断面的基础上,计算简单方便,可对多重扰动下的低频振荡进行预警,且能应用于扰动严重性的判断。New England 10 机系统和实际系统的仿真算例验证了该方法的有效性。

关键词: 电力系统; 低频振荡; 多重扰动; 能量函数; 预警指标; 稳定裕度增量; 稳定性

中图分类号: TM 712 文献标识码: A

# 0 引言

低频振荡问题是电力系统稳定研究的主要问题 之一<sup>[1-3]</sup>。我国已建成特高压同步电网,电网运行方 式和运行特性复杂多变,电网的稳定性将不可避免地 下降。电网的一些薄弱环节在多重扰动作用下将会 导致电网低频振荡问题,严重时会波及全网<sup>[4]</sup>。综合 多个预警指标判断电网在多重扰动下是否会发生低 频振荡,及时给出预警,为电力系统运行决策人员提 供抑制低频振荡的技术支持,对进一步促进电网实现 智能化具有重要意义。

G. C. Ejebe 等提出了一种动态安全评估系统, 可以通过监测电力系统的状况,确定系统的运行限 度,并最终定量计算每次事故时系统的安全或不安 全程度<sup>[5]</sup>。C. W. Taylor 提出了一种基于 BPA 的在 线安全评估和广域控制方案,在考虑传输线的热稳 定极限、电压和功角稳定问题的前提下,直接监测现 有工作点的安全情况,并对事故进行电脑仿真<sup>[6]</sup>。华 北电力大学开展了低频振荡在线预警系统的研究工 作,由于需要和 MATLAB 接口,该预警系统尚处于 研究阶段<sup>[7]</sup>。云南电力调度中心与国网电力科学研 究院合作研究的"云南电网低频振荡安全预警及辅 助决策系统",充分利用已建成并稳定运行的云南电 网广域量测系统数据平台,及时发现低频振荡的发 生,识别振荡模式,并向调度员发出告警信号<sup>[8]</sup>。以 上预警系统对低频振荡的预警指标依赖于对功角曲

收稿日期:2012-04-11;修回日期:2012-11-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51077103);国家高技 术研究发展计划(863 计划)(2011AA05A119);国家电网公司 大电网重大专项资助项目(SGCC-MPLG029-2012)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51077103), the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA-05A119) and State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid (SGCC-MPLG029-2012) DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.01.006

线的 Prony 分析,且仅依靠阻尼比这个单一指标,不 能综合评价多重扰动的影响。因此,考虑建立其他 类型的低频振荡新型预警指标,实现多个指标互相辅 助、互相验证,对电力系统低频振荡进行及时、准确 的预警。

能量函数方法是一种能快速分析系统在预想事 故下的暂态稳定度,并进行预想事故严重性排队及 作出告警的动态安全分析方法<sup>[9]</sup>。用系统的状态变 量表示的能量函数描述了系统在故障时阶段及故障 后阶段不同时刻系统的能量。这种能量是由故障激 发,并在故障阶段形成<sup>[10]</sup>。能量函数法不是从时域 角度去看稳定问题,而是从系统能量角度去看稳定问 题,故可快速作稳定判断,而不必计算整个系统运动 轨迹,即不必逐步积分计算。随着研究的深入,能量 函数方法已经达到实用化的阶段。

本文将对传统的能量函数进行简化,提出基于观 测断面潮流的能量函数稳定裕度增量指标,快速、有 效地对电力系统重要输电线路进行低频振荡预警。

#### 1 传统能量函数

电力系统能量函数理论认为:电力系统作为一个 物理系统,存在一个能量函数,该函数量化了系统所 包含能量的相对大小,能够描述系统的稳定程度,能 量越高,稳定性越差。对于多机系统的能量函数,依 据系统结构的描述形式不同,有多种表述方式。其 中,最经典的是基于惯性中心(COI)的描述形式<sup>[11]</sup>:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} J_i w_i^2 - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \left[ C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^s) \right] - \sum_{i=1}^{n} P'_{mi}(\theta_i - \theta_i^s) - \int_{\theta^* + \theta_i}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j)$$
(1)

其中, $\theta_i^*$ 为稳定平衡点处第*i*个节点的角度; $J_i = H_i\omega_0$ 为第*i*台发电机的标幺值惯量, $\omega_0$ 为基准角频率;n为发电机台数; $w_i$ 为发电机转速与同步转速的偏差;

第 33 卷第 1 期

2013年1月

 $C_{ij} = E_i E_j B_{ij}, D_{ij} = E_i E_j G_{ij}, E_i$ 为第 i台发电机暂态电抗 后的电势,  $B_{ij}, G_{ij}$ 为收缩到发电机内节点的支路电纳 和电导。由式(1)可见, 能量函数包括以下 4 项。

**a.**  $\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} J_i w_i^2$ :在 COI 参考坐标下所有发电机的 转子动能的变化。

**b.**  $\sum_{i=1}^{n} P'_{mi}(\theta_i - \theta_i^s)$ :相对于 COI 的所有电机的转子 势能变化。

**c.**  $\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} [C_{ij}(\cos\theta_{ij} - \cos\theta_{ij}^{s})]$ :所有支路内所存储的磁场能量的变化。

**d.**  $\int_{\theta_i+\theta_j}^{\theta_i+\theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i+\theta_j)$ : 所有支路内损耗的能量变化。

**a** 项称为动能( $V_{ke}$ ),其仅是发电机转速的函数; **b**、**c**、**d** 项之和称为势能( $V_{pe}$ ),仅是发电机功角的函数。本文所述功角都是针对发电机暂态电势而言的, 即以发电机的内缩暂态电势为节点进行分析。

传统的能量函数分析理论都是基于整个系统的 观测量来分析的,是将系统进行分散考虑而得到的, 其物理背景和工程背景都是清晰的,但该分析结果 在实际应用中受到了太多制约因素的限制,导致到 目前为止,能量函数理论在实际大电网中的应用仍停 留在理论分析的阶段。

#### 2 基于观测断面的能量函数简化

#### 2.1 断面潮流分析模型

对于互联电网的分析,可以采用分解成部分后 逐个分析的思想,将分析的对象设定为分散的母线 和其间的线路。每次的观测对象仅定为母线间的线 路,即观测断面。当选择观测断面后,对全网的分析 就便捷地转化为对每个观测断面的分析,这样就实现 了全网的分散解耦分析。当取母线1和母线2之间 的联络线为观测对象时,电网可以简单地描述为如图 1所示的联系图。



图 1 观测断面上互联电网的联系图 Fig.1 Connection diagram of interconnected grid on observation section

母线 1 通过母线两端的变压器、发电机中性点接地形成回路。回路所包含的阻抗为母线 1 的自阻抗  $Z_{11} = R_{11} + jX_{11}$ 和母线 1 与母线 2 之间线路阻抗

Z<sub>12</sub>=R<sub>12</sub>+jX<sub>12</sub>,也即转移阻抗。以母线1和母线2为 参考节点,两母线之间的联络线为研究对象,若从二 端口网络的角度来分析问题,只要辨识出了系统的 自阻抗和互阻抗,就能很好地描述网络的特征。而互 阻抗由线路参数唯一确定,故只需要辨识出首端母线 的自阻抗参数即可。图1所示断面可以化简为如图 2所示的等效电路模型,这样观测断面就可以用简单 的电路模型来分析。



图 2 观测断面的等效电路模型

Fig.2 Equivalent circuit model of observation section

若 $|Z_{11}| \angle \varphi_{11}$ 、 $|Z_{22}| \angle \varphi_{22}$ 分别为首、末端的自阻抗,  $|Z_{12}| \angle \varphi_{12}$ 为首末端的互阻抗。由传输功率的定义, 并将阻抗角用相应的余角表示,即 $\varphi_{11}=\pi/2-\alpha_{11},\varphi_{22}=\pi/2-\alpha_{22},\varphi_{12}=\pi/2-\alpha_{12},\alpha_{11}$ 为线路首端自阻抗相角 的余角, $\alpha_{12}$ 为线路阻抗角的余角。首端传输的功率 可以简化为:

$$\begin{cases} P_{1} = \frac{U_{1}^{2}}{|Z_{11}|} \sin \alpha_{11} + \frac{U_{1}U_{2}}{|Z_{12}|} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}) \\ Q_{1} = \frac{U_{1}^{2}}{|Z_{11}|} \cos \alpha_{11} - \frac{U_{1}U_{2}}{|Z_{12}|} \cos (\delta_{12} - \alpha_{12}) \end{cases}$$
(2)

式(2)给出了观测断面上功率传输的表达式,该 表达式即是通常意义下的功角曲线。只是这里的功 率不再是发电机的输出功率,而是线路首端向末端传 输的功率。

对于式(2),母线1电压  $U_1=U_1 \angle \delta_1$ ,母线2电压  $U_2=U_2 \angle \delta_2$ ,式中 $\delta_{12}=\delta_1-\delta_2$ 。由仿真得到的 $P_e$ 结合式 (2)可以得到 $p=\sin\alpha_{11}/|Z_{11}|$ 的实时值,由仿真数据  $Q_e$ 结合式(2)可以得到 $q=\cos\alpha_{11}/|Z_{11}|$ 的实时值。自 阻抗的实时幅值为 $|Z_{11}|=1/\sqrt{p^2+q^2}$ ,实时相角为  $\alpha_{11}=\arctan(p/q)$ 。因为首端母线的自阻抗参数 $|Z_{11}|$ 、  $\alpha_{11}$ 与线路的物理和电气特性有关,因此应为基本不 变的常量。通过仿真辨识首端母线的自阻抗信息p的变化情况,发现其随时间变化非常小,可以取它们 的平均值作为辨识结果。

这是一种基于实际观测数据和物理模型倒推的 方法,该方法能够实时地确定首端自阻抗的值,不受 负荷模型类型影响。同时,该模型实际上是将系统 在联络线母线电压处进行等效得到的,是 COI 模型 的推广。

#### 2.2 基于断面潮流分析模型的能量函数

能量函数分析方法在实际应用中将遇到一个难题:如何求得系统的 COI,该问题对于小系统而言比较容易,尤其对于单机无穷大系统比较简单。但当

系统的规模扩大后,发电机的数量急剧增加,导致 COI 的求取十分复杂。

当发电机暂态电抗和负荷阻抗包括在节点导纳 矩阵中时,有:

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{G}} = \boldsymbol{Y}_{\mathrm{R}} \boldsymbol{E}_{\mathrm{G}} \tag{3}$$

其中, $Y_{\rm R}$ 为发电机内节点消去后的所有节点的简化 导纳矩阵; $E_{\rm G}$ 为发电机内电动势源相量; $I_{\rm G}$ 为发电 机电流相量。

令第*i*台发电机的内电动势用相量符号表示为: $E_i = E_i \angle \delta_i$ 。 $Y_R$ 的第*i*行、第*j*列为 $y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ 。对于有*n*台发电机的系统,第*i*台发电机的有功输出为:

$$P_i = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^n E_i E_j [B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (4)$$

为了应用能量函数方法,用发电机转子角描述系统的暂态行为是方便的,而转子角是相对于所有发电机的 COI 的。COI 的位置定义为: $\delta_{COI} = \frac{1}{H_T} \sum_{i=1}^{n} H_i \delta_i$ ,其中, $H_T$ 为系统中所有n台发电机的惯性系数的总和。 COI 的运动由下式决定.

$$\begin{cases} \Delta \dot{\omega}_{\text{COI}} = \frac{1}{H_{\text{T}}} P_{\text{COI}} = \frac{1}{H_{\text{T}}} \sum_{i=1}^{n} (P'_{\text{m}i} - P_{ei}) \\ \dot{\delta}_{\text{COI}} = \Delta \omega_{\text{COI}} \omega_{0} \end{cases}$$
(5)

其中, $P'_{mi}=P_{mi}-E_i^2G_{ii}$ 为发电机暂态电势节点等效 自导纳的电导部分, $E_i$ 为发电机的内缩电势, $P_{mi}$ 为 发电机的机械输入功率; $P_{ei}=\sum_{j=1}^{n}E_iE_j[B_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j)+G_{ij}\times\cos(\delta_i-\delta_j)]$ 描述的是发电机发出的有功在网络上的 传输部分,即能量函数中的网络能量部分实际上就 是该部分能量对功角的积分。

由 COI 模型给出的能量函数表达式是基于发电 机的内缩节点电势来描述的,这样的描述形式需要 知道发电机的暂态电势和每台发电机的功角,及以发 电机暂态电势为节点的网络自阻抗和互阻抗,显然当 系统中的发电机数量过大时,这样的求取方法是得不 到实际条件允许的。另外,以发电机内缩电势为节 点的系统导纳矩阵也不便于求取。

在深入理解能量函数的基础上,可以联系等效 系统模型将能量函数进行转换。实际中,基于分析 电力系统稳定性的本质特征,可以等效为等值2机系 统的有以下3种类型:

a. 从大容量电力系统取用功率的功率不足系统;

b. 通过强联络线相连的 2 个容量相近的系统;

c. 通过弱联络线相连的2个容量相近的系统。

在暂态稳定研究中为突出主要矛盾常采用某些 假设以简化分析,如忽略网络中的电磁暂态,即忽略 突发故障后网络中的非周期性分量电流,假定故障 后的暂态过程中网络的频率接近额定频率,以及当 发生不对称故障时,忽略发电机定子回路中的负序电 流和零序电流,即只计及正序分量的电磁功率<sup>[10]</sup>。将 实际系统按照上述标准等效为2机系统,基于母线 电压参考节点的等值2机系统如图3所示。



图 3 基于母线电压参考节点的等效 2 机系统 Fig.3 Equivalent two-machine system based on voltage reference bus

参考传统的基于 COI 的能量函数分析方法,以 联络线母线1为参考节点,系统1的等效状态方程可 以描述为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_1 = \omega_{r1} \omega_0 \\ \vdots \\ H_{T1} \dot{\omega}_{r1} = P'_{m1} - P'_{e1} \end{cases}$$
(6)

同理,系统2的状态方程可以描述为:

$$\begin{vmatrix} \dot{\delta}_2 = \omega_{r2} \omega_0 \\ H_{-r} \dot{\omega}_{r2} = P'_{r2} = P'_{r2} \end{vmatrix}$$
(7)

其中, P'm1、P'm2 为母线 1 的等效注入功率, P'e1、P'e2 为母线 1 和母线 2 间联络线上的传输功率。

式(6)、(7)给出了两区域系统的等值状态方程 描述形式,需要说明的是,在稳态时忽略线路功率损 耗近似有 P'm1=-P'm2=P'e1=-P'e2。将两系统状态变量相 减可以得到新的系统,这实际上是 2 机系统向单机无 穷大系统转化的过程。等效的单机无穷大系统的状 态方程为:

$$\hat{\delta}_{12} = \omega_{r12} \omega_{0} \dot{\omega}_{r12} = \dot{\omega}_{r1} - \dot{\omega}_{r2} = \frac{1}{H_{T1}} (P'_{m1} - P'_{e1}) - \frac{1}{H_{T2}} (P'_{m2} - P'_{e2})$$

$$\frac{}{R_{X} \text{ mid}} = \frac{1}{H_{T1}} (P'_{m1} - P'_{e1}) - \frac{1}{H_{T2}} (P'_{m2} - P'_{e2})$$

$$(8)$$

整理得:

$$\hat{\delta}_{12} = \omega_{r12}\omega_0$$

$$\dot{\omega}_{r12} = \dot{\omega}_{r1} - \dot{\omega}_{r2} = \left(\frac{1}{H_{T1}} + \frac{1}{H_{T2}}\right) (P'_{m1} - P'_{e1})$$
(9)

令  $H_{eq} = \frac{H_{T1}H_{T2}}{H_{T1} + H_{T2}}$  为单机系统的等值惯性时间

常数,系统进一步化简为:

ſ

$$\begin{cases} \delta_{12} = \omega_{r12} \omega_{0} \\ \vdots \\ \omega_{r12} = \omega_{r1} - \omega_{r2} = \frac{1}{H_{eq}} (P'_{m1} - P'_{el}) \end{cases}$$
(10)

其中, $\delta_{12}$ 为母线1、2之间的相角差; $\omega_{12}$ 为母线间角 速度标幺值差; $P'_{11}$ 为系统1的等效注入机械功率, 在稳态时,该值等于联络线上有功功率的传输值,在 暂态情况下可以利用式(6)反演出来;P'el为联络线 上传输的有功功率,该值可利用系统等效的节点电势 来计算,在模型中,所选取的节点为母线电压,P'el 即 为母线电压的函数。利用二端口网络理论,流经首 端母线的电磁功率 Pel 为:

$$P_{\rm el} = \frac{U_1^2}{|Z_{11}|} \sin \alpha_{11} + \frac{U_1 U_2}{|Z_{12}|} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}) \qquad (11)$$

那么, P'el 可表示为:

$$P_{\rm el}' = \frac{U_1 U_2}{|Z_{12}|} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) \tag{12}$$

由复功率理论和电网络分析中的节点注入电流 方程,该功率传输表达式也可以简单地描述为:

$$P'_{\rm e1} = U_1 U_2 (B_{12} \sin \delta_{12} + G_{12} \cos \delta_{12}) \tag{13}$$

那么,根据能量函数定义的4个组成部分,整个 两区域系统的能量函数可以完全利用联络线上潮流 和母线电压来唯一确定。

$$V = \frac{1}{2} H_{eq} \omega_0 \omega_{12}^2 - P'_{m1} (\delta_1 - \delta_1^s) - P'_{m2} (\delta_2 - \delta_2^s) - U_1 U_2 B_{12} (\cos \delta_{12} - \cos \delta_{12}^s) + U_1 U_2 G_{12} (\sin \delta_{12} - \sin \delta_{12}^s) = \frac{1}{2} H_{eq} \omega_0 \omega_{12}^2 - P'_m (\delta_{12} - \delta_{12}^s) - U_1 U_2 B_{12} (\cos \delta_{12} - \cos \delta_{12}^s) + U_1 U_2 G_{12} (\sin \delta_{12} - \sin \delta_{12}^s)$$
(14)

其中, $\omega_{12}$ 为线路首末端频率差; $P'_{m}$ 为线路传输的有 功功率; $\delta_{12}^*$ 为稳定平衡点(SEP)下的线路首末端电 压相角差,可以利用断面潮流分析模型中的式(2)反 演求得; $U_1$ 为线路首端电压; $U_2$ 为线路末端电压; $B_{12}$ 为线路首末端电纳; $G_{12}$ 为线路首末端电导。

当等值2机系统的能量函数中动能为零时,即 可得到系统的临界能量函数:

 $V_{\rm cr} = -P_{\rm m}'(\delta_{12}^{\rm u} - \delta_{12}^{\rm s}) - U_1 U_2 B_{12}(\cos \delta_{12}^{\rm u} - \cos \delta_{12}^{\rm s}) +$ 

 $U_1 U_2 G_{12}(\sin \delta_{12}^u - \sin \delta_{12}^s)$  (15) 其中, $\delta_{12}^u = \pi - \delta_{12}^s$ ,为不稳定平衡点(UEP)下的线路 首末端电压相角差。

由于广域的电力系统总是强相关、强耦合的非 线性巨系统,这样的系统对分析有一个好处就在于系 统的局部变量都是由整个巨系统的全局变量演化得 到的,所以局部变量能够反映全局变量的信息,即从 系统自身的特性出发给予了利用简单的表达式来求 取广域巨系统能量函数的可能。这是从系统侧出发 来看待问题得到的结果。

#### 3 低频振荡新型预警指标的建立

基于 COI 的经典理论,单机无穷大系统的稳定 度可以用  $V_{\text{er}} - V_{\text{e}}$ 定量描述,从而对事故严重性排 队,以便作动态安全分析,实际应用中使用的是规格 化的稳定度,即传统的稳定裕度指标  $V_{\text{Vn}}$ ,通常定义  $V_{\text{Vn}} = (V_{\text{er}} - V_{\text{e}})/V_{\text{kle}}$ ,其中, $V_{\text{er}}$ 为临界暂态能量, $V_{\text{e}}$ 为系 统的实时暂态能量, Vkle 为系统的动能。

将基于观测断面<sup>[12-15]</sup>的能量函数应用于研究输 电线路的低频振荡问题。显然,每当发生一重扰动 时,低频振荡的线路暂态能量都会发生跳变,传统的 稳定度指标不能用来衡量扰动对系统发生低频振荡 的危险程度。定义稳定裕度增量指标  $V_{\text{Sice}} = V_{\text{Vn}}(t) - V_{\text{Vn}}(t-1),其中, V_{\text{Vn}}(t-1)为前一时刻的稳定裕度, <math>V_{\text{Vn}}(t)$ 为后一时刻的稳定裕度。若发生扰动后,系统的稳 定裕度增量指标  $V_{\text{Sice}} < 0$ ,则说明系统的稳定程度急 剧下降,一方面可以进行预警并避免更加严重的扰动 发生,另一方面可以根据稳定裕度增量的大小来判 断该扰动对系统影响的严重程度<sup>[16]</sup>。

### 4 仿真与分析

#### 4.1 简单系统算例

以图 4 所示的 New England 10 机 39 节点系统 为算例系统验证本文所提方法的有效性,仿真计算 采用中国电科院研制的综合程序(PSASP)为仿真工 具。线路 8-9 的初始潮流为 24.566 MW,在给定的 潮流方式下,设置系统的多重扰动如表 1 所示。监 测线路 8-9 的传输功率曲线和发电机 34 与 39 间的 功角差曲线。



图 4 New England 10 机系统 Fig.4 New England 10-machine system

表 1 多重扰动设置

Tab.1 Settings of multi-disturbance

扰动描述	一重扰动	二重扰动	三重扰动
地点	17-18	14-15	27-17
类型	三相断线	三相断线	三相断线
时间	2.09~30 s	2.39~30 s	2.79~30 s

线路 8-9 的有功功率传输(标幺值,后同)、发电机 34 与 39 间相角差 δ<sub>12</sub>、提取出的传统稳定裕度和 自定义的稳定裕度增量分别在一重扰动、二重扰动、 三重扰动发生时的曲线如图 5、6、7 所示。 一重扰动和二重扰动发生后,线路上出现减幅 的功率振荡,发电机功角差曲线亦出现振荡,但呈现 收敛趋势;三重扰动发生后,线路上出现增幅的功率 振荡,发电机功角差曲线已呈现发散趋势,说明此时 系统已经失稳。观测传统稳定裕度,其数值与系统 具体状态参数有关,无法起到预警的功能。



(c) 传统稳定裕度



图 / 二里仉切及生时的茶玩扒芯重变化 Fig.7 Change of system state variables when triple-disturbance happens

算例中设置的扰动均为三相断线,2.09 s 发生三 相断线扰动时,在 2.92 s 系统的稳定裕度增量首次出 现负值,说明此时系统的稳定性发生急剧下降;2.39 s 发生三相断线扰动时,稳定裕度增量出现负值是在 2.73 s;2.79 s 发生三相断线扰动时,稳定裕度增量出 现负值仍在 2.73 s。随着扰动的发生与叠加,系统稳 定程度急剧下降的时刻也出现提前的趋势;对整个系 统而言,二重扰动发生后,系统已有发生增幅振荡的 危险,此时在 2.73 s 就要进行预警并采取措施,如不 采取措施而继续发生三重扰动,如在 2.79 s 发生三相 断线扰动,则系统会出现增幅振荡导致失稳的情况。

#### 4.2 实际系统算例

使用 2009 年 H 电网计算数据,设置 Y 省送 E 省 断面潮流为 5 000 MW 时,监测 Y-E 省间联络线 F-B 的传输功率。线路 F-B 由双回线路 EF-B 500 kV

表 2 运行方式不同的多重扰动设置 Tab.2 Settings of multi-disturbance under different operating modes

unaor	amorone operating	modeo
扰动描述	一重扰动	二重扰动
地点	А	В
类型	三相断线	三相短路
时间	1~50 s	6~6.1 s

I 侧和 EF-B 500 kV Ⅱ 侧组成。扰动设置如表 1 所示,基准功率和基准电压分别为:S<sub>B</sub>=100 MV·A,U<sub>B</sub>=500 kV。

一重扰动和二重扰动发生时,线路 F-B 的传输 功率曲线分别如图 8、9 所示。

提取系统全过程的稳定裕度增量,如图 10 所示。



图 8 一重扰动发生时线路 F-B 传输功率

Fig.8 Transmission power of line F-B when single-disturbance happens



图 9 二重扰动发生时线路 F-B 传输功率

Fig.9 Transmission power of line F-B when dual-disturbance happens





Fig.10 Stability margin increment in whole process

当一重扰动发生时,线路 F-B 上的功率传输曲 线振荡并不明显;当二重扰动发生时,线路 F-B 发 生增幅振荡,系统失稳。对稳定裕度增量进行全过 程监测,当 t=6s时,增量出现第1次大的负值点, 说明此时系统的稳定性发生急剧下降,要进行预警并 采取相应措施。这与实际中6s时B地发生三相短 路这一严重故障,从而导致系统失稳是相吻合的。

# 5 结论

本文提出了电力系统在多重扰动下的一种新型 的低频振荡预警指标——能量函数稳定裕度增量 指标。

a. 相同类型的扰动发生于不同的时刻,其扰动

的严重程度是一样的。其稳定裕度增量为负值的时 刻并未完全与发生扰动的时刻对应,但随着扰动发 生的叠加,其稳定裕度增量为负值,即预警的时刻提 前了,这与实际情况是相符合的。

**b.** 不同类型的扰动发生于不同的时刻,其扰动 严重程度可以由稳定裕度增量负值的大小得出。预 警的时刻与发生严重扰动的时刻相同,应在此时发 出预警并采取紧急控制措施。

c. 能量函数稳定裕度增量指标仅依赖支路的动态信息,而不需要发电机的运动变量,可以采用支路状态量进行计算,在实际应用中,将区域间联络线作为联络线观测断面即可。该方法简单,易于实现,具有在线应用的潜力。

#### 参考文献:

 [1] 樊爱军,雷宪章,刘红超,等.研究大规模互联电网区域间振荡的 特征值分析方法[J].电网技术,2005,29(17):35-39.
 FAN Aijun,LEI Xianzhang,LIU Hongchao, et al. Eigenvalue

analysis methods for inter-area oscillations in large-scale interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2005,29(17):35-39.

[2] 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.

- [3] 董明齐,杨东俊,黄涌,等. 华中电网 WAMS 实测区域低频振荡 仿真[J]. 电网技术,2009,33(13):64-69.
   DONG Mingqi,YANG Dongjun,HUANG Yong, et al. Simulation of regional low frequency oscillation based on data measured by WAMS of Central China Power Grid[J]. Power System Technology, 2009,33(13):64-69.
- [4] 向农. 跨区电网低频振荡的机理与控制研究[D]. 武汉:武汉大学,2009.

XIANG Nong. Study on mechanism and control measurement of low frequency oscillation in interregional power grid[D]. Wuhan, China:Wuhan University,2009.

- [5] EJEBE G C. On-line dynamic security assessment in an EMS[J]. IEEE Computer Application in Power, 1998, 11(1):43-47.
- [6] TAYLOR C W. The future in on-line security assessment and wide-area stability control[C] //IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Singapore:[s.n.],2000;78-83.
- [7] 崔小磊. 电力系统低频振荡在线预警系统研究[D]. 保定:华北电力大学,2005.
   CUI Xiaolei. Research of on-line early-warning system on low-frequency oscillation in power system[D]. Baoding:North China Electric Power University,2005.
- [8] 王凯. 云南电网低频振荡预警及辅助决策系统构建方案[J]. 云南 电力技术,2009,37(2):20-22.
   WANG Kai. Construction blue print for low frequency oscillation pre-warning and assistant decision system in Yunnan province
   [J]. Yunnan Electric Power,2009,37(2):20-22.
- [9] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论与分析[M]. 北

京:清华大学出版社,2002:344-351.

- [10] 刘笙,汪静. 电力系统暂态稳定的能量函数分析[M]. 上海:上 海交通大学出版社,1996.
- [11] PRABHA K. Power system stability and control[M]. New York, USA;McGraw-Hill Inc, 1994.
- [12] 云雷,刘涤尘,张琳,等.负荷特性对跨区大电网低频振荡的影响研究[J].电力自动化设备,2009,29(8):41-45.
   YUN Lei,LIU Dichen,ZHANG Lin, et al. Influence of load

characteristics on low frequency oscillation in cross-regional power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29 (8):41-45.

- [13] 何仰赞,温增银. 电力系统分析[M]. 武汉:华中科技大学出版 社,2002:13-14.
- [14] 潘学萍,敖雄,张丽钦. 电力系统主导振荡断面的快速判断[J]. 电力自动化设备,2009,29(12):10-14.
  PAN Xueping,AO Xiong,ZHANG Liqin. Fast assessment of power system critical oscillation interface[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(12):10-14.
- [15] 邓集祥,涂进,陈武晖.大干扰下主导低频振荡模式的鉴别[J]. 电网技术,2007,31(7):36-41.

DENG Jixiang, TU Jin, CHEN Wuhui. Identification of critical low frequency oscillation mode in large disturbances [J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 36-41.

 [16] 陈中. 电力系统小干扰稳定实时控制[J]. 电力自动化设备, 2012,32(3):42-46.
 CHEN Zhong. Real-time stability control of power system with small disturbance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(3):42-46.

#### 作者简介:

宫 璇(1982-),女,吉林白山人,博士研究生,研究方向 为电力系统稳定、运行与控制(E-mail:gongxuan19831117@ 163.com);

刘涤尘(1953-),男,湖北红安人,教授,博士研究生导师, 研究方向为电力自动监控技术、电力系统稳定与控制、电力电 子技术应用等;

董 超(1988-),男,湖北黄石人,硕士,研究方向为电力 系统稳定、运行与控制及信号分析与处理。

#### Early warning indicator of low frequency oscillation based on energy function

GONG Xuan, LIU Dichen, DONG Chao, LIAO Qingfen, WANG Bo, HONG Min

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract**: The practical analysis model of sectional power flow is proposed to realize the dispersive and decoupling analysis of whole power network. The observation sections of power network are properly selected and the power flow analysis is carried out for each observation section. The traditional energy function based on inertia centre is simplified and the stability margin increment indicator, instead of the traditional stability margin indicator, is proposed which, based on the tie-line observational section of power system, can be easily calculated and used as the seriousness criterion of disturbance and the early warning of low frequency oscillation under multi-disturbance. Its validation is verified by the simulations for New England 10-machine system and actual system.

**Key words**: electric power systems; low frequency oscillation; multi-disturbance; energy function; early warning indicator; stability margin increment; stability

<u></u>

(上接第 27 页 continued from page 27)

# Indirect, adaptive, fuzzy and distributed $H_{\infty}$ control for multi-machine power system

WU Zhongqiang, SONG Minghou, FU Liyuan

(Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province,

Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract**: Based on the multi-machine excitation control model and the multi-variable, strong-coupling and nonlinear system characteristics, an indirect, adaptive, fuzzy and distributed  $H_{x}$  tracking control scheme is proposed based on the fuzzy approximating, which constructs the fuzzy adaptive system to approximate the unknown function and designs the  $H_{x}$  compensator to eliminate the external disturbance and the error of fuzzy approximating. The stable control of multi-machine power system is thus realized with  $H_{x}$  property. Simulative results show that, the operational angle of generator rotor tends to a stable value and both the relative angular velocity and the tracking error tend to zero when three-phase recoverable or unrecoverable faults occurs in multi-machine power system. Compared with PSS scheme, the proposed scheme has shorter settling time and smaller overshoot.

Key words: electric power systems; adaptive control; fuzzy logic system; fuzzy control; stability; error analysis

34