

# 两区域互联系统联络线功率波动理论分析

陈磊<sup>1</sup>, 刘辉<sup>2</sup>, 闵勇<sup>1</sup>, 李群炬<sup>2</sup>, 吴涛<sup>2</sup>

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;  
2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京市 西城区 100045)

## Theoretical Analysis on Tie-Line Power Oscillation of Two-Area Interconnected System

CHEN Lei<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>2</sup>, MIN Yong<sup>1</sup>, LI Qunju<sup>2</sup>, WU Tao<sup>2</sup>

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China; 2. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100045, China)

**ABSTRACT:** The tie-line power oscillation of the two-area interconnected system due to power impacts is strictly derived. The power oscillation process caused by disturbance is divided into three stages, namely before, during and after the disturbance, and dynamic equation for each stage is established and the variation of the state point is derived. Based on the theory of distribution of impact powers in power systems, the tie-line power of the two-area system after power impacts is analysed. After the disturbance, the tie-line power takes on damped oscillation of inter-area low-frequency oscillation mode, and the steady-state power depends upon the total inertia time constant of the generators in both areas, meanwhile the expression of power oscillation similar to step response of second-order system is derived and the formula for the peak power during the first swing, which is mainly determined by the ratio of total inertia time constant of both areas and the damping ratio of the inter-area oscillation mode, is obtained. The effectiveness of the proposed equations is verified by numerical simulations and the analysis on the generator-tripping contingency of North China and Central China interconnected system.

**KEY WORDS:** interconnected system; tie-line; impact power; power oscillation; damping ratio

**摘要:** 严格推导了发生功率冲击时两区域互联系统联络线功率振荡的表达式。将发生功率扰动的系统分为扰动前、扰动瞬间和扰动后3个阶段,建立每个阶段的动态方程并推导运行点的变化。基于冲击功率的分配理论,推导了两区域互联系统在发生功率扰动后联络线功率的变化。扰动后,联络线功率呈现出区间振荡模式的衰减振荡,功率稳态值由两区域内发电机的总惯性时间常数确定,同时得到了类似于二阶系统阶跃响应的功率振荡表达式和第一摆功率峰值的计算式。数值仿真以及华北-华中互联系统掉机事故分析验证了结果的有效性。

**关键词:** 互联系统; 联络线; 冲击功率; 功率波动; 阻尼比

## 0 引言

2008年12月1000 kV 长治—南阳—荆门特高压交流试验示范工程投入运行<sup>[1-10]</sup>。长治—南阳—荆门特高压联络线是目前华北和华中2大区域电网之间唯一的联络线。该工程投运以来,当华中或华北电网出现功率扰动(如跳机、直流闭锁等)时,特高压联络线上会产生大幅度的功率波动。在几次跳机事故中,功率波动第1摆的幅度达到了跳机甩负荷量的90%以上,给特高压联络线的安全带来了威胁。大幅度的功率波动已成为影响特高压联络线输电能力进一步提高的重要因素<sup>[11-13]</sup>。

文献[12-13]对特高压联络线功率波动进行研究,得到了相同的功率波动峰值计算公式。特高压联络线功率波动的峰值与大区振荡模式的阻尼比、跳机甩负荷量和华北-华中机组惯性常数之比相关。文献[13]详细分析了功率扰动后冲击功率的分配,并建立两区域互联系统线性化模型分析联络线功率波动。文献[12-13]利用二阶系统阶跃响应分析联络线功率波动,应用了阶跃响应的结果,但推导过程还不是十分清晰,阶跃响应是动态系统的输入量为阶跃函数时输出量的响应,但文献[12-13]并未说明发生功率扰动的系统如何简化为二阶系统,输入量和输出量如何定义。本文在文献[12-13]的基础上,对两区域互联系统联络线功率波动进行理论分析,建立不同阶段电网的动态模型,严格推导得到联络线功率波动的理论表达式。

## 1 冲击功率的分配机制

当电网中出现功率扰动(负荷的投入或切除、

发电机掉机、直流闭锁等)时,功率的突然变化会导致发电和负荷间的不平衡,在系统平息到新的稳态情况之前,将要产生一个振荡的暂态过程,引起系统频率和功率振荡。发生功率扰动后,各台发电机的输出功率都会发生变化,冲击功率在各台发电机之间进行分配。扰动后不同的时间,冲击功率在发电机之间的分配情况不同。关于冲击功率的分配,文献[13-14]均进行了研究,本文引用其主要结论如下。

### 1) 扰动瞬间。

假设在节点  $k$  处有一个冲击功率  $\Delta P_k$ , 则扰动瞬间发电机  $i$  分配的功率为

$$\Delta P_i = \frac{K_{ik}}{\sum_{j=1}^n K_{jk}} \Delta P_k \quad (1)$$

式中  $K_{ik} = E_i U_k B_{ik} \cos \delta_{ik}$ , 为发电机  $i$  和扰动节点  $k$  之间的同步功率系数, 主要与  $B_{ik}$  成正比,  $B_{ik}$  反映发电机与扰动点的“电气距离”。

### 2) 调速器动作前。

发电机  $i$  的输出功率变化为

$$\Delta P_i = \frac{T_{ji}}{\sum_{j=1}^n T_{jj}} \Delta P_k \quad (2)$$

式中  $T_{ji}$  为发电机  $i$  的惯性时间常数。

### 3) 调速器动作后。

调速器动作后,发电机将按照初始功率和调速器调差系数分配功率。

## 2 两区域互联系统联络线功率波动理论推导

### 2.1 两区域互联系统

图 1 所示为两区域互联系统及等值电路。设受端系统发生功率扰动,则联络线上的功率变化等于送端系统发电机的功率变化。送端系统的总发电和总负荷分别为  $P_{G,S}, P_{L,S}$ , 受端系统的总发电和总负荷分别为  $P_{G,R}, P_{L,R}$ 。送、受端系统发电机的总惯性时间常数分别为  $T_{J,S}, T_{J,R}$ , 平均调差系数分别为  $R_{g,S}, R_{g,R}$ 。联络线受端距离受端系统等值发电机内节点的电抗为  $X_2$ , 联络线电抗为  $X_L$ , 联络线送端距离送端系统等值发电机内节点的电抗为  $X_1$ 。冲击功率大小为  $\Delta P$ , 发生在受端系统, 即扰动点距离送端系统等值发电机内节点的电抗为  $X_S = X_L + X_1$ , 距离受端系统等值发电机内节点的电抗为  $X_R = X_2$ , 一般  $X_S \gg X_R$ 。

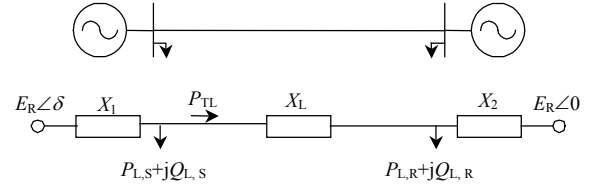


图 1 两区域互联系统及等值电路

Fig. 1 Two-area interconnected system and its equivalent circuit

将功率冲击的整个过程分为 3 个阶段: 扰动前、扰动瞬间和扰动后。

### 2.2 扰动前系统方程和运行点

电力系统的动态方程用式(3)所示的微分代数方程描述, 其中微分方程表示系统中的动态过程,  $x$  为状态变量, 包括发电机功角、转速等, 在暂态过程中不能突变。代数方程为网络约束方程,  $y$  为代数变量, 主要是节点电压、电流等, 暂态过程中可以突变。  $P$  为系统参数, 此处主要是负荷,  $P_0$  为功率冲击前系统的负荷。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y, P_0) \\ 0 &= g(x, y, P_0) \end{aligned} \quad (3)$$

扰动前系统运行在稳定平衡点  $(x_0, y_0)$  处, 即

$$\begin{aligned} f(x_0, y_0, P_0) &= 0 \\ g(x_0, y_0, P_0) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

联络线潮流是运行点的函数, 表示为

$$P_{TL0} = h(x_0, y_0) \quad (5)$$

在图 1 所示系统中,  $P_{TL0} = P_{G,S} - P_{L,S} = P_{L,R} - P_{G,R}$ 。

### 2.3 扰动瞬间运行点的变化

在扰动瞬间, 参数  $P$  发生变化, 由  $P_0$  变为  $P_1$ ,  $P_1 = P_0 + \Delta P$ 。状态变量不能突变, 但代数方程(网络方程)必须得到满足, 因此代数变量会在扰动瞬间发生变化, 由  $y_0$  变为  $y_1$ ,  $y_1$  满足

$$g(x_0, y_1, P_1) = 0 \quad (6)$$

系统运行点由  $(x_0, y_0)$  突变为  $(x_0, y_1)$ , 由于联络线潮流和系统代数变量(主要是节点电压)有关, 也会发生突变, 由  $P_{TL0}$  突变为  $P_{TL1} = h(x_0, y_1)$ 。

根据 2.2 节的分析, 冲击功率  $\Delta P$  在各个发电机之间按照发电机节点和扰动节点之间的同步功率系数进行分配, 主要和电气距离相关。因此, 在图 1 所示系统中有

$$\begin{aligned} P_{TL1} &= P_{TL0} + \Delta P \frac{K_{Sk}}{K_{Sk} + K_{Rk}} = \\ &P_{TL0} + \Delta P \frac{E_S U_k B_{Sk} \cos \delta_{Sk}}{E_S U_k B_{Sk} \cos \delta_{Sk} + E_R U_k B_{Rk} \cos \delta_{Rk}} \approx \\ &P_{TL0} + \Delta P \frac{X_S^{-1}}{X_S^{-1} + X_R^{-1}} \approx P_{TL0} + \Delta P \frac{X_R}{X_S + X_R} \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $K_{Sk}, K_{Rk}$  分别为送端和受端等值发电机与扰动节点之间的同步功率系数。

当  $X_S \gg X_R$  时,  $P_{TL1} \approx P_{TL0}$ 。

## 2.4 扰动后系统动态过程

扰动后系统的动态方程为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{P}_1) \\ \mathbf{0} &= \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{P}_1) \end{aligned} \quad (8)$$

系统以  $(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_1)$  为初始点, 在上述动态方程的约束下运动。

设系统的稳定平衡点为  $(\mathbf{x}_s, \mathbf{y}_s)$ , 系统如果稳定, 轨迹最终会收敛到  $(\mathbf{x}_s, \mathbf{y}_s)$  处, 达到稳定状态时联络线功率为  $P_{TLs} = h(\mathbf{x}_s, \mathbf{y}_s)$ 。下面推导扰动后联络线功率的表达式。

在非奇异的情况下, 根据隐函数定理, 可将代数变量和代数方程消去, 得到系统的微分方程, 表示为  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}'(\mathbf{x})$ , 系统稳定平衡点为  $\mathbf{x}_s$ 。系统扰动后 ( $t=0^+$  s 以后) 的轨迹即方程  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}'(\mathbf{x})$  以  $\mathbf{x}_0$  为初始点的轨迹。

当冲击功率不大时, 状态空间中初始点  $\mathbf{x}_0$  距离平衡点  $\mathbf{x}_s$  很近, 可以采用小扰动分析的方法进行分析。系统在平衡点处线性化得到

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{x} \quad (9)$$

状态矩阵  $\mathbf{J}$  的特征值、左特征向量、右特征向量分别表示为  $\lambda_i$ 、 $\boldsymbol{\psi}_i$ 、 $\boldsymbol{\phi}$ 。根据线性系统理论, 状态变量的轨迹为

$$\Delta \mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^n [\boldsymbol{\psi}_i \Delta \mathbf{x}(0)] e^{\lambda_i t} \boldsymbol{\phi} \quad (10)$$

式中  $\Delta \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_s$ 。

跳机事故在电力系统分析中一般被认为是大扰动, 但扰动的大小是相对的。华北-华中互联电网的总负荷超过 150 GW, 即使 GW 级的机组跳机, 冲击功率占总负荷的比例也不到 1%, 比例很小, 冲击前后的系统平衡点距离很近, 因此可以采用小扰动分析的方法进行分析。网络较小、冲击功率的比例较大时, 需要详细考虑大扰动情况下的非线性特性。

联络线功率  $P_{TL}$  表示为状态变量的函数, 设为  $P_{TL} = h'(\mathbf{x})$ , 在平衡点处线性化可得

$$\Delta P_{TL} = P_{TL} - P_{TLs} = \mathbf{b} \Delta \mathbf{x} = \sum_{i=1}^n [\boldsymbol{\psi}_i \Delta \mathbf{x}(0)] (\mathbf{b} \boldsymbol{\phi}) e^{\lambda_i t} \quad (11)$$

设系统主导模式对应的特征值为  $\sigma \pm j\omega_d$ , 则式(11)所示的联络线振荡功率可近似为

$$\Delta P_{TL} = A e^{\sigma t} \sin(\omega_d t + \theta) \quad (12)$$

式(12)中含有 2 个未知数  $A, \theta$ , 求解需要 2 个方程。

1) 在  $t=0^+$  s 时, 将  $t=0$  带入式(12)可得

$$\Delta P_{TL}(0^+) = A \sin \theta = P_{TL1} - P_{TLs} \quad (13)$$

2) 扰动瞬间发电机的转速不会突变, 即  $\Delta \boldsymbol{\omega}(0) = \mathbf{0}$ , 根据发电机转子运动方程, 扰动瞬间  $\Delta \dot{\boldsymbol{\delta}} = \Delta \boldsymbol{\omega} = \mathbf{0}$ 。联络线功率  $P_{TL}$  和发电机转速  $\Delta \boldsymbol{\omega}$  无关, 并进一步假设  $P_{TL}$  只与发电机功角  $\boldsymbol{\delta}$  有关, 即忽略暂态过程中其他状态变量(如发电机 q 轴暂态电势  $E'_q$ ) 对  $P_{TL}$  的影响, 则  $P_{TL}$  变化量可写成  $\Delta P_{TL} = \mathbf{b}' \Delta \boldsymbol{\delta}$ , 因此, 在  $t=0^+$  s 时刻有

$$\Delta \dot{P}_{TL} = \mathbf{b}' \Delta \dot{\boldsymbol{\delta}} = 0 \quad (14)$$

带入式(12)得

$$\begin{aligned} \Delta \dot{P}_{TL}(0) &= A(\sigma \sin \theta + \omega_d \cos \theta) = \\ &A \sqrt{\sigma^2 + \omega_d^2} \sin(\beta - \theta) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

式中  $\beta = \arccos \zeta$ ,  $\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega_d^2}}$  为主导模式的阻尼比。

已得到 2 个方程式(13)和式(15), 求解可得

$$\theta = \arccos \zeta, \quad A = \frac{P_{TL1} - P_{TLs}}{\sin \theta} \quad (16)$$

因此,  $t=0^+$  s 后联络线功率变化量的表达式为

$$\Delta P_{TL}(t) = \frac{P_{TL1} - P_{TLs}}{\sin \theta} e^{\sigma t} \sin(\omega_d t + \theta) \quad (17)$$

联络线功率的表达式为

$$P_{TL}(t) = P_{TLs} + \frac{P_{TL1} - P_{TLs}}{\sin \theta} e^{\sigma t} \sin(\omega_d t + \theta) \quad (18)$$

在  $t=0^+$  s 时刻  $\Delta \dot{P}_{TL} = 0$ , 振荡功率达到极值。根据  $\Delta \dot{P}_{TL}$  的表达式, 下一个极值点发生在  $\omega_d t = \pi$  时刻, 与扰动时刻振荡功率之比为

$$\frac{\Delta P_{TL}(\pi/\omega_d)}{\Delta P_{TL1}} = \frac{A e^{\sigma \pi/\omega_d} \sin(\pi + \theta)}{A \sin \theta} = -e^{-\pi \zeta / \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (19)$$

即符号相反, 幅值之比为  $e^{-\pi \zeta / \sqrt{1-\zeta^2}}$ , 与二阶系统中的超调量是一致的<sup>[15]</sup>。极值点处的联络线功率为

$$\begin{aligned} P_{TLm} &= P_{TLs} + \Delta P_{TL}(\pi/\omega_d) = \\ &P_{TLs} - e^{-\pi \zeta / \sqrt{1-\zeta^2}} (P_{TL1} - P_{TLs}) = \\ &P_{TLs} + e^{-\pi \zeta / \sqrt{1-\zeta^2}} (P_{TLs} - P_{TL1}) \end{aligned} \quad (20)$$

在图 1 所示系统中, 扰动后如果不考虑调速器影响, 则稳态功率为

$$P_{TLs} = P_{TL0} + \Delta P \frac{T_{J,S}}{T_{J,S} + T_{J,R}} \quad (21)$$

如果  $X_S \gg X_R$ ,  $P_{TL1} \approx P_{TL0}$ , 代入式(20)可得第一摆功率峰值为

$$P_{TLm} \approx P_{TL0} + \Delta P \frac{T_{J,S}}{T_{J,S} + T_{J,R}} (1 + e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}}) \quad (22)$$

上述推导基于单一主导振荡模式的假设，当线路上表现出多个振荡模式时，推导结果不再成立。互联电网中存在大量振荡模式，如华北-华中互联电网中，主要振荡模式有华北-华中、山东-蒙西、川渝-华中东 4 省等。然而特高压联络线作为两大区域电网之间唯一的联络线，主要表现出华北-华中振荡模式，仿真分析和实测波形均说明了这一点，因此，上述推导用于分析特高压联络线功率波动是有效的。如果系统不能等值为一个两区域系统(如将来的三华同步电网)，联络线上可能表现出多个振荡模式，则不能用本节的结论进行计算分析。

## 2.5 对结果的讨论

式(22)和文献[12-13]中的结果是一致的。与文献[12-13]相比，本文的分析更加清晰严格。首先明确了发生功率扰动后联络线功率的变化过程，分析了功率扰动前、扰动瞬间和扰动后系统动态方程以及运行点的变化。扰动瞬间，代数变量发生突变，联络线功率也发生突变。扰动后，当只存在单一主导振荡模式时，联络线功率为衰减振荡的形式。其次，本文的推导更为严格。扰动后联络线功率振荡的幅值和初始相角为未知数，求解需要 2 个方程：1) 扰动瞬间功率已知；2) 假设扰动后联络线功率主要受发电机功角影响，则可推导得到联络线功率在故障瞬间对时间的导数为零，由此得到 2 个方程，求解即得到扰动后联络线功率的表达式，推导过程清晰严格。文献[12-13]中的结果(即式(22))是存在一定的假设条件的，是在做一些合理近似后的结果。

联络线功率第 1 摆波动主要是机电振荡模式的表现，受发电机惯性时间常数影响较大，而受调速系统影响不大，在到达第 1 摆峰值时，调速器通常尚未引起原动机机械功率大幅度变化。因此，在计算第 1 摆的功率峰值时，不用考虑调速器的影响，即稳态功率  $P_{TLs}$  根据两端等值发电机的惯性时间常数确定。调速系统影响联络线功率的稳态值，但对波动过程中的功率峰值影响较小，即使有一定的影响，也是通过影响振荡模式的阻尼比从而影响振荡功率峰值。后续仿真验证了该结论。

## 3 仿真分析

### 3.1 简单系统仿真

图 1 所示系统中，调速器导致的机械功率变化

用一阶惯性环节描述，即  $\Delta P_m = -\frac{1}{1+T_g s} \frac{\Delta \omega}{R_g} P_N$ ，其中  $T_g$  为惯性环节时间常数， $R_g$  为调差系数， $P_N$  为发电机额定功率。

系统参数(标么值)如下：

送端。母线电压  $U_1=1.00$ ，负荷  $P_{L,S}=8.0$ ， $Q_{L,S}=1.0$ ，等值发电机  $P_{m,S}=10.0$ ， $T_{J,S}=900$  s， $D_S=0.02$ ， $X_1=0.01$ ，调速器参数  $R_{g,S}=0.05$ ， $T_{g,S}=0.5$  s。

受端。母线电压  $U_2=1.00$ ，负荷  $P_{L,R}=12.0$ ， $Q_{L,R}=1.0$ ，等值发电机  $P_{m,R}=10.0$ ， $T_{J,R}=600$  s， $D_R=0.02$ ， $X_2=0.01$ ，调速器参数  $R_{g,R}=0.03$ ， $T_{g,R}=0.5$  s。

联络线电抗  $X_L=0.10$ 。

$t=0$  s 时发生扰动，受端负荷突然增加  $\Delta P=0.2$ 。扰动前联络线功率  $P_{TL0}=2.0000$ ，联络线功率波动如图 2 所示。扰动瞬间，根据式(7)计算得到联络线功率突变为  $P_{TL1}=2.0167$ 。扰动后，根据两端等值发电机惯性时间常数计算稳态功率，得到稳态功率  $P_{TLs}=2.1200$ ，进一步根据式(20)计算得到功率峰值为 2.2137，实际的功率峰值为 2.2018，功率变化量的相对误差为 5.90%，如图 2 所示。如果忽略故障瞬间联络线功率的突变，采用式(22)计算得到的功率峰值为 2.2288，功率变化量的相对误差为 13.38%，误差变大。因此，式(22)忽略了故障瞬间联络线功率的突变，做近似处理，会增加一定的误差。

同时注意到，根据两端等值发电机惯性时间常数计算得到的稳态功率误差较大，根据调速器参数计算得到的稳态功率为 2.0750，由图 2 可以看到，该稳态功率较准确。因此，在计算联络线功率第 1 摆峰值时，可以不考虑调速器对稳态功率的影响，调速器的影响考虑在振荡模式的阻尼比里面，但应根据两端等值发电机调速器调差系数计算最终的稳态功率。

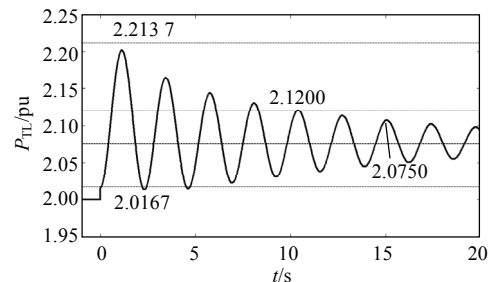


图 2 联络线功率波动

Fig. 2 Oscillation of tie-line power

### 3.2 掉机事故分析

长治—南阳—荆门特高压联络线投运以来，发

生过多起掉机事故,利用本文结果对记录的几次掉机事故进行分析,计算峰值功率并和实测值进行比较,结果如表1所示。华北电网和华中电网的装机容量比约为1.5:1,华北、华中电网在不同运行方式下的惯性时间常数比为1.1~1.5,两大区域电网之间主导振荡模式的阻尼比为0.07~0.20<sup>[4]</sup>。取惯性时间常数比为1.3,阻尼比为0.14进行计算。

表1 掉机事故分析结果

Tab. 1 Analysis results of generator-tripping contingencies

事故	峰值功率变化量相对误差/%
2008-12-29 三峡切机	1.95
2009-05-15 三峡掉机	-3.65
2009-04-05 邹县掉机	-0.81
2009-07-23 三峡掉机	0.70
2010-01-20 沧东掉机	8.91

选取2008年12月29日特高压动态扰动试验进行进一步分析。在特高压南送1.5 GW方式下,切除1台700 MW三峡机组。联络线初始功率1505 MW,故障时功率突变为1534 MW,如图3所示,与前文分析结果相一致,即在故障瞬间联络线潮流发生突变。联络线功率最大值为2142 MW,根据式(22)计算得到的功率峰值为2154 MW,误差很小。计算得到联络线功率曲线和实测曲线的比较如图3所示。在第1摆的功率波动中,计算值和实测值吻合得较好。

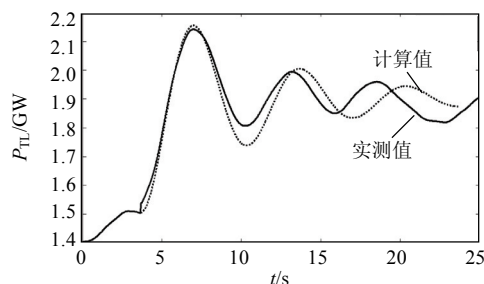


图3 特高压联络线功率波动

Fig. 3 Power oscillation of UHV line

## 4 结论

本文对两区域互联系统联络线功率波动进行理论分析,严格推导了联络线功率振荡的表达式。基于冲击功率在发电机间的分配机制,分析系统在扰动前、扰动瞬间和扰动后的动态方程以及运行点的变化,得到不同阶段的联络线功率。当冲击功率占全网负荷的比例很小时,可以采用线性化的方法进行分析,严格推导了单一主导模式时联络线功率振荡的表达式以及第1摆功率峰值的计算公式。最终结论与文献[12-13]中的一致,但本文的推导过程

更加清晰严格,有助于更清晰地认识功率扰动后系统运行点和联络线功率的变化过程,深入认识特高压联络线功率波动的机制并采取相应控制措施。当联络线上表现出多个振荡模式时,功率波动和功率峰值的表达式还需要进一步研究。

## 参考文献

- [1] 舒印彪, 张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 1-6.  
Shu Yinbiao, Zhang Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 1-6(in Chinese).
- [2] 舒印彪, 张文亮, 周孝信, 等. 特高压同步电网安全性评估[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 1-6.  
Shu Yinbiao, Zhang Wenliang, Zhou Xiaoxin, et al. Security evaluation of UHV synchronized power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 1-6(in Chinese).
- [3] 梁旭明, 张国威, 徐玲玲, 等. 1000kV 交流特高压试验示范工程的生产准备工作与实施[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 12-16.  
Liang Xuming, Zhang Guowei, Xu Lingling, et al. Investigation and implementation of production preparation for 1000kV AC test and pilot project[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 12-16(in Chinese).
- [4] 赵良, 郭强, 覃琴, 等. 特高压同步电网稳定特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 47-51.  
Zhao Liang, Guo Qiang, Qin Qin, et al. Analysis on stability characteristics of UHV synchronized power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 47-51(in Chinese).
- [5] 叶俭, 李明节, 周济, 等. 特高压交流试验示范工程无功电压控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 29(22): 25-29.  
Ye Jian, Li Mingjie, Zhou Ji, et al. Research on reactive power and voltage control strategies for the UHV AC demonstration project[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 29(22): 25-29(in Chinese).
- [6] 易俊, 孙华东, 郭强, 等. 大型电源基地接入特高压输电系统方式研究[J]. 电网技术, 2009, 33(16): 14-19.  
Yi Jun, Sun Huadong, Guo Qiang, et al. Research on modes of connecting bulk power bases to power grids by UHV transmission systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(16): 14-19(in Chinese).
- [7] 高林, 戴义平, 马庆中, 等. 特高压线路解列后区域互联电网一次调频稳定性研究[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 27-32.  
Gao Lin, Dai Yiping, Ma Qingzhong, et al. Research on stability of primary frequency regulation of interconnected power system after trip-out of ultra-high voltage transmission line[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 27-32(in Chinese).
- [8] 沈国辉, 刘金波, 陈光, 等. 特高压调度运行支持系统关键技术[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 33-37.  
Shen Guohui, Liu Jinbo, Chen Guang, et al. Key technologies for UHV dispatching operation support system[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 33-37(in Chinese).
- [9] 尚学伟, 李立新, 卓峻峰, 等. 特高压交流示范工程投运后华北电网 AGC 策略的改进[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 31-34.  
Shang Xuewei, Li Lixin, Zhuo Junfeng, et al. Improvement of strategies of AGC in north China power grid after UHVAC pilot project operation[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 31-34(in Chinese).



- Chinese).
- [10] 张健, 张文朝, 肖扬, 等. 特高压交流示范工程系统调试仿真研究及验证分析[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 29-32.  
Zhang Jian, Zhang Wenchao, Xiao Yang, et al. Simulation and verification of system commissioning test for 1000 kV AC pilot project[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 29-32(in Chinese).
- [11] 张伟, 常青, 张剑云. 特高压互联系统联初期动态稳定特性及控制措施[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 19-24.  
Zhang Wei, Chang Qing, Zhang Jianyun. Dynamic stability characteristic and control strategies of the UHV system in initial operation period[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(21): 19-24(in Chinese).
- [12] 刘辉, 吴涛, 李群炬, 等. 特高压交流示范工程功率摆动机制分析[J]. 中国电力, 2010, 43(7): 9-13.  
Liu Hui, Wu Tao, Li Qunju, et al. Power swing mechanism analysis of UHV AC pilot project[J]. Electric Power, 2010, 43(7): 9-13(in Chinese).
- [13] 汤涌, 孙华东, 易俊, 等. 两大区互联系统交流联络线功率波动机制与峰值计算[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 1-6.  
Tang Yong, Sun Huadong, Yi Jun, et al. AC tie-line power fluctuation mechanism and peak value calculation for two-area interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 1-6(in Chinese).
- [14] Anderson P M, Fouad A A. Power system control and stability[M]. AMES, IOWA: The Iowa State University Press, 1977: 69-79.
- [15] 戴忠达. 自动控制理论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991: 186-189.



陈磊

收稿日期: 2011-04-01。

作者简介:

陈磊(1982), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为电力系统动态分析与控制, E-mail: chenlei08@mail.tsinghua.edu.cn;

刘辉(1975), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析和规划;

闵勇(1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与实时监控技术;

李群炬(1960), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划;

吴涛(1968), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析。

(责任编辑 马晓华)

## 第二届中国电网调度智能化发展峰会征文通知

由中国电力发展促进会与中国南方电网公司共同主办, 南方电网科学研究院和广西电网公司共同协办的第二届中国电网调度智能化发展峰会, 将于2011年11月23—26日在广西北海召开。现向广大科技工作者、生产一线技术人员公开征集论文。

### 征文内容

本次会议征稿面向智能电网调度技术专业领域。

1、远动及厂站自动化。在线监测与诊断技术, 传感器技术, 数据信息采集、处理与传输系统, 配电自动化系统(DMS)及设备的开发应用, 自控保护装置, AVC在电网侧的应用, 高级电力电子技术的应用等。

2、智能调度支撑技术。智能调度技术支持系统, 调度信息管理应用, 节能发电调度技术, 一体化模型管理技术, 广域测量技术, 海量信息处理技术, 可视化展现技术, 地理信息接入技术, 电网实时监控与预警技术, 调度预警与决策支持技术, 智能电网安全防御技术, 分布式发电监控技术以及调控一体化管理技术等。

3、调度通信系统。调度通信专网建设及技术解决方案, 网络系统时钟同步技术, 网络信息安全防护, 交互式通信技术。

4、前沿技术研究。电网运行全息监控技术, 智能变电站, 高级量测体系AMI、高级配电运行ADO、高级输电运行ATO、高级资产管理AAM等。

### 论文要求及提交方式

1、本次征文只收录未曾发表的论文全文, 请勿一稿多投。

2、来稿一律用电子邮件, 统一使用“作者姓名: 论文题目”作为邮件主题和文件名, 传送到专用电子邮箱: diaodufenghui2011@163.com。

具体征文要求及格式请登录: [www.chinapower.com.cn/temp/diaodu/](http://www.chinapower.com.cn/temp/diaodu/)

### 征文时间安排

1、论文征文截止日期: 2011年10月20日前

2、论文录用通知和会议通知发放: 2011年11月10日前

### 联系方式

中国电力发展促进会

联系人: 叶发贵

电话: 010-88824369

传真: 010-88820190

邮箱: yfg1973@163.com

南方电网科学研究院

联系人: 王昕

电话: 020-38120482

传真: 020-38120847

邮箱: wangxincsg@163.com