

# 惯性时间常数对互联系统暂态稳定性影响的仿真研究

寇凌岳<sup>1</sup>, 艾欣<sup>2</sup>

(1. 北京超高压公司, 北京 102413; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

**摘要:** 通过对单机无穷大系统和等值两机系统进行数学推导, 得出系统惯量的变化与互联系统暂态稳定水平的关系; 应用EUROSTAG进行时域仿真, 在IEEE-39系统中分别验证了受端与送端系统转动惯量对弱互联电网暂态稳定性的影响。系统惯量越大, 系统相对角变化速度越慢, 在大区弱互联系统中, 送端系统与受端系统间相对角变化速度不一致。因此, 当送端系统惯量增加时, 提高了系统暂态稳定水平; 受端系统惯量增加时, 降低了系统暂态稳定水平。

**关键词:** 系统惯量; 弱互联系统; 暂态稳定

## Simulation study of system inertia on power system transient stability

KOU Ling-yue<sup>1</sup>, AI Xin<sup>2</sup>

(1. Beijing EHV Power Transmission Company, Beijing 102413, China;

2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** In this paper, single machine infinite system and equivalent two machine system are analyzed to indicate the relationship between the inertia and the transient stability of the system. It's analyzed by a time-domain simulation using EUROSTAG and validated the importance of the inertia in weak interconnect systems in IEEE-39. The greater the inertia of the system, the slower system relative angles change, in weak connected systems, the send subsystem and end subsystem with weak links, relative angles between two subsystems change differently, so inertias of subsystems affect the transient stability of the system dissimilarly.

**Key words:** system inertia; weak interconnect system; transient stability

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)15-0042-06

## 0 引言

大区域电网交流互联后, 其规模不断扩大, 如何保证电力系统稳定运行将变得更加严峻。系统稳定运行的重要原则之一, 是控制输电断面运行在暂态稳定极限值以内, 因此暂态稳定极限值计算尤为重要。影响暂态稳定性因素主要有, 网架结构、开机方式、自动装置的配置、元件和负荷特性以及电网的负荷水平等, 除负荷特性及负荷水平外, 其它因素均是确定的, 而对特定网络, 负荷模型和负荷水平变化也不大<sup>[1]</sup>, 而电网大区域互联后, 变化最大的是受端系统惯量增大, 而相对联络线两端发电机群摇摆更加剧烈, 因此, 系统惯量对大区域电网的暂态稳定影响是不可忽视的。

文献[2]应用单机等面积判据分析多机系统, 并推导出了多机系统的时间等面积判据和角度等面积判据, 选出临界机组, 以第一摆加速和减速面积大小判断系统稳定性。文献[3,4]将互联电网等值为两机系统进行数学推导, 得出受端系统惯性时间常数对

互联系统暂态稳定的影响。文献[5]通过弱互联系统与强互联系统的对比, 得出弱互联系统削弱系统阻尼的机理, 并在两机系统中推导出了阻尼矩阵的解析式。

本文的主要内容是通过对单机无穷大系统、等值两机系统数学推导和时域仿真分析的基础上, 得出送端系统和受端系统惯量变化时, 对电力系统暂态稳定性的影响。最后, 分析在多机系统中, 发电机惯性时间常数的增加会对不同断面造成不同的影响, 验证了受端系统和送端系统惯量变化对互联系统暂态稳定性的影响。

## 1 单机无穷大系统

发电机转子运动方程:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P_M}{M} - \frac{EU}{XM} \sin \delta \quad (1)$$

其中:  $P_{M0} = \frac{EU}{X_0} \sin \delta_0$ , 系统初始运行状态。

设系统单位质量的动能为  $V_k = \frac{1}{2} \omega^2$ ,  $\omega$  为发电机转速, 在初始稳态条件下,  $\omega_0 = 0$ , 故  $V_{k0} = 0$ 。式(1)左右两端分别乘以  $\omega$  和  $\frac{d\delta}{dt}$ , 由于  $\omega = \frac{d\delta}{dt}$ , 积分得

$$\frac{1}{2} \omega^2 = \frac{P_M}{M} (\delta - \delta_0) + \frac{EU}{x_1 M} (\cos \delta - \cos \delta_0) \quad (2)$$

系统受到扰动后, 系统中暂态能量由两部分组成:

1) 系统发生故障到故障切除期间的能量( $\delta_0$  为初始运行角度,  $\delta_c$  为故障切除时刻功角值)

$$\frac{1}{2} \omega_1^2 = \frac{P_M}{M} (\delta_c - \delta_0) + \frac{EU}{x_1 M} (\cos \delta_c - \cos \delta_0) =$$

加速能量 (3)

在  $\delta_0$  和切除时间不变的情况下, 增加发电机惯性时间常数, 则故障切除角  $\delta_c$  变小, 因此, 式(3)在惯性时间常数增加后的表达式为

$$\frac{1}{2} \omega_1'^2 = \frac{P_M}{M'} (\delta_c' - \delta_0) + \frac{EU}{x_1 M'} (\cos \delta_c' - \cos \delta_0) \quad (4)$$

由式(4)-式(3), 得

$$\frac{1}{2} \Delta \omega^2 = \frac{P_M}{M'} (\delta_c' - \delta_0) - \frac{P_M}{M} (\delta_c - \delta_0) + \frac{EU}{x_1} \left( \frac{1}{M'} \cos \delta_c' - \frac{1}{M} \cos \delta_c \right) + \frac{EU}{x_1} \cos \delta_0 \left( \frac{1}{M} - \frac{1}{M'} \right) \quad (5)$$

上式中右端第一项  $\frac{P_M}{M'} (\delta_c' - \delta_0) - \frac{P_M}{M} (\delta_c - \delta_0)$  小于零, 第二项  $\frac{1}{M'} \cos \delta_c' - \frac{1}{M} \cos \delta_c$  小于零, 第三项大于零, 但  $\frac{1}{M} - \frac{1}{M'}$  为一个很小的正数, 所以随着惯性时间常数的增加, 系统加速能量不断减小。

2) 故障切除后功角增加过程中的能量( $\delta_c$  为故障切除时刻功角值,  $\delta_m$  为积分终止时功角值, 此时取第一摆最大值)

$$\frac{1}{2} \omega_2^2 = \frac{P_M}{M} (\delta_m - \delta_c) + \frac{EU}{x_2 M} (\cos \delta_c - \cos \delta_m) =$$

减速能量 (6)

在  $\delta_0$  和切除时间不变的情况下, 增加发电机惯

性时间常数, 故障切除角  $\delta_c$  减小, 最大摇摆角  $\delta_m$  也减小, 且变化是同步的, 因此, 此时系统减速能量变化不大。

在单机无穷大系统中, 发电机惯性时间常数增大, 则功角变化的速度越慢, 这将减少故障期间加速能量<sup>[6]</sup>。如图 1 中所示, 在发电机出力、故障切除时间不变的情况下, 惯性时间常数与切除时刻角度和第一摆最大值之间的关系(发电机出力不变, 虚线为  $\delta_c$ , 实线为  $\delta_{max}$ )。

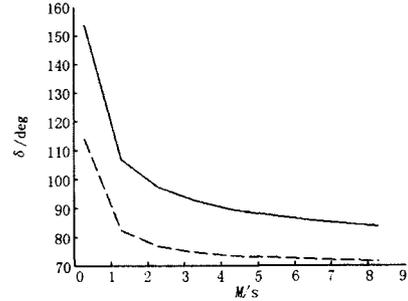


图 1 惯性时间常数与功角关系

Fig.1 Relationship between inertia time constant and angle

## 2 等值两机系统

### 2.1 暂态稳定数学模型

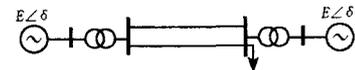


图 2 等值两机系统

Fig.2 Equivalent two machine system

$$\frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = (P_{M1} - P_{E1}) / M_1 \quad (7)$$

$$\frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = (P_{M2} - P_{E2}) / M_2 \quad (8)$$

式中:  $\delta$  为发电机转子角度,  $\omega$  为发电机的转子角加速度,  $\omega_0$  分别为额定同步转速,  $M$  为发电机惯性时间常数,  $P_M$ ,  $P_E$  分别为原动机机械功率和发电机电磁功率。

根据网络功率平衡方程式, 可得发电机电磁功率:

$$P_{E1} = E_1^2 G_{11} + E_1 E_2 G_{12} \cos \delta_{12} + E_1 E_2 B_{12} \sin \delta_{12} \quad (9)$$

$$P_{E2} = E_2^2 G_{22} + E_1 E_2 G_{12} \cos \delta_{12} - E_1 E_2 B_{12} \sin \delta_{12} \quad (10)$$

对于输电系统, 电阻远小于电抗, 即  $G \ll B$ , 则可假设  $G = 0$ , 从而可以得出:

$$P_{E1} = E_1^2 G_{11} + E_1 E_2 B_{12} \sin \delta_{12} \quad (11)$$

$$P_{E2} = E_2^2 G_{22} - E_1 E_2 B_{12} \sin \delta_{12} \quad (12)$$

对于初始稳态情况下,  $\delta_{12} = \delta_0$ , 发电机原动机机械功率与电磁功率相等, 即

$$P_{M1} = P_{E10}, \quad P_{M2} = P_{E20}$$

$$P_{M1} = E_1^2 G_{11} + E_1 E_2 B_{12} \sin \delta_0 \quad (13)$$

$$P_{M2} = E_2^2 G_{22} + E_1 E_2 B_{12} \sin \delta_0 \quad (14)$$

当系统中发生故障时, 发电机的电磁暂态功率发生变化, 即将公式(7)减去式(8)并代入公式(11)和(12), 由此得出

$$\frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = \frac{P_{M1} - E_1^2 G_{11}}{M_1} - \frac{P_{M2} - E_2^2 G_{22}}{M_2} - \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) E_1 E_2 B_{12} \sin \delta_{12} \quad (15)$$

式(14)右边多项式分为两部分, 一部分与系统相对角无关, 记为  $P_M$ , 与系统相对角有关的部分, 记为  $P_E$ , 两端积分得出单位质量动能:

1) 系统发生故障到故障切除期间的能量( $\delta_0$ 为初始运行角度,  $\delta_c$ 为故障切除时刻功角值)

$$P_1 = E_1 E_2 B_{12} \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) (\delta_c - \delta_0) \sin \delta_0 + E_1 E_2 B_{12}' \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) (\cos \delta_c - \cos \delta_0) \quad (16)$$

2) 故障切除后系统相对角增加过程中的能量( $\delta_c$ 为故障切除时刻功角值,  $\delta_m$ 为积分终止时刻功角值, 此时取第一摆峰值)

$$P_2 = E_1 E_2 B_{12} \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) (\delta_m - \delta_c) \sin \delta_0 + E_1 E_2 B_{12}'' \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) (\cos \delta_m - \cos \delta_c) \quad (17)$$

则系统中的暂态能量为

$$P = P_1 + P_2 \quad (18)$$

将式(15)和式(16)代入到式(17)中, 得双机系统暂态能量具体表达式为:

$$P = E_1 E_2 B_{12} \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) (\delta_m - \delta_0) \sin \delta_0 +$$

$$E_1 E_2 \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) (B_{12}'' \cos \delta_m - B_{12}'' \cos \delta_c + B_{12}' \cos \delta_c - B_{12}' \cos \delta_0) \quad (19)$$

在初始运行角和切除时间不变的情况下, 送端系统的惯性时间常数从  $M_1$  增加到  $M_1'$ , 由于送端系统惯性时间常数增加, 引起送端系统发电机在故障切除时刻角度和积分终止时刻角度减小, 从而使得两机系统  $\delta_c$  和  $\delta_m$  减小为  $\delta_c'$  和  $\delta_m'$ , 即可得出变化后的暂态能量

$$P' = E_1 E_2 B_{12} \left( \frac{1}{M_1'} + \frac{1}{M_2} \right) (\delta_m' - \delta_0) \sin \delta_0 + E_1 E_2 \left( \frac{1}{M_1'} + \frac{1}{M_2} \right) (B_{12}'' \cos \delta_m' - B_{12}'' \cos \delta_c' + B_{12}' \cos \delta_c' - B_{12}' \cos \delta_0) \quad (20)$$

通过比较两个能量之差, 研究送端系统惯性时间常数  $M_1$  增大, 对暂态能量的影响。暂态能量中, 第一项=

$$E_1 E_2 B_{12} \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) (\delta_m - \delta_0) \sin \delta_0,$$

第二项=

$$E_1 E_2 \left( \frac{1}{M_1'} + \frac{1}{M_2} \right) (B_{12}'' \cos \delta_m' - B_{12}'' \cos \delta_c' + B_{12}' \cos \delta_c' - B_{12}' \cos \delta_0)$$

$P'$  和  $P$  中第一项, 即暂态能量中的加速能量差为负, 表示送端系统惯性时间常数增加时, 系统中加速能量减小; 第二项, 由于  $\delta_c$  和  $\delta_m$  的变化是同步的, 所以送端系统惯性时间常数变化时, 其大小变化不大, 因此,  $P' - P < 0$ , 由此可得, 送端系统转动惯量在增加时, 将导致暂态能量减小, 系统暂态稳定水平提高。

同理, 在上述条件下, 受端系统的惯性时间常数从  $M_2$  增加到  $M_2'$ , 由于受端系统惯性时间常数增加, 引起受端系统在故障切除时刻角度和积分终止时刻角度减小, 从而使得两机系统  $\delta_c$  和  $\delta_m$  增加为  $\delta_c''$  和  $\delta_m''$ , 即可得出变化后的暂态能量

$$P'' = E_1 E_2 B_{12} \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2'} \right) (\delta_m'' - \delta_0) \sin \delta_0 + E_1 E_2 \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2'} \right) (B_{12}'' \cos \delta_m'' - B_{12}'' \cos \delta_c'' +$$

$$B_{12}' \cos \delta_c'' - B_{12}' \cos \delta_0) \quad (21)$$

$P''$ 和 $P$ 中第一项, 由于 $M_2$ 和 $\delta_m$ 都增加, 所以其值变化不大; 第二项中, 由于 $\delta_m$ 和 $\delta_c$ 增大, 则第二项中各项都减小, 因为第二项为负值,  $P''-P>0$ , 表示受端系统惯性时间常数增加时, 将导致暂态能量增大, 系统暂态稳定水平降低。

## 2.2 仿真分析

仿真系统结构如图2所示, 发电机采用经典二阶模型, 负荷模型为恒阻抗模型, 负荷为515 MW, 其中受端系统出力为100 MW, 送端系统出力为415 MW, 初始时刻送端系统惯性时间常数为8.3 MW.S/MVA, 受端系统惯性时间常数为6.3 MW.S/MVA。故障设置为双回线的其中一回线路发生三相短路故障, 0.1 s 切除故障, 并切除故障线路, 在以下仿真中故障切除时间均不变。图3为在发电机出力不变, 且送端惯性时间常数不变的情况下, 改变受端系统惯性时间常数, 此时系统相对角变小, 与理论分析一致。

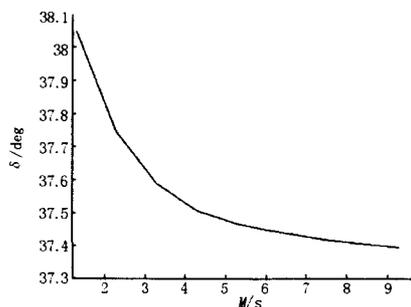


图3 受端系统惯性时间常数与系统相对角的关系

Fig.3 Relationship between inertia of receiving system and relative angle

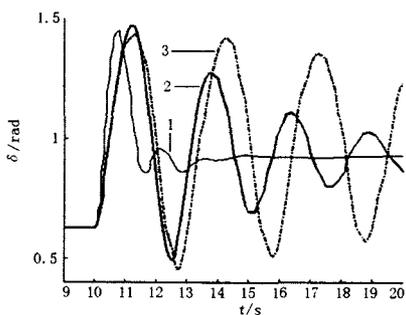


图4 系统相对角变化曲线

Fig.4 Relative angles

图4中, 送端系统惯性时间常数不变, 曲线1的受端系统惯性时间常数为1.3 s, 曲线2的受端系统惯性时间常数为6.3 s, 曲线3的受端系统惯性时间常数为9.3 s。在相同的故障条件下, 当受

端系统惯性时间常数增大时, 等值两机系统摇摆角增大, 且摇摆时间增长, 则表示暂态稳定水平下降。

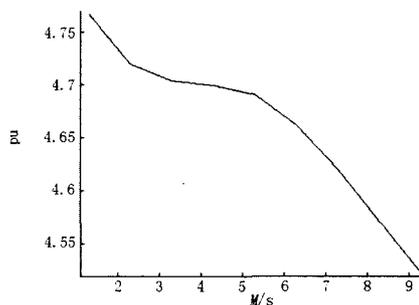


图5 受端系统惯性时间常数与暂态稳定极限值的关系

Fig.5 Relationship between inertia time constant of receiving system and limit of transient stability

图4中, 受端系统惯性时间常数增加, 两机系统摇摆角的第一摆幅值不断增大, 且振荡时间和幅度都增加, 由此可以看出, 受端系统惯性时间常数增大, 系统稳定性将降低。如图5中所示线路传输暂态稳定极限值随受端系统惯性时间常数的增加而减小。

同理, 在受端系统不变的情况下, 调整送端系统惯性时间常数, 仿真结果如图6所示, 与增加受端系统惯性时间常数得到相反的结果。

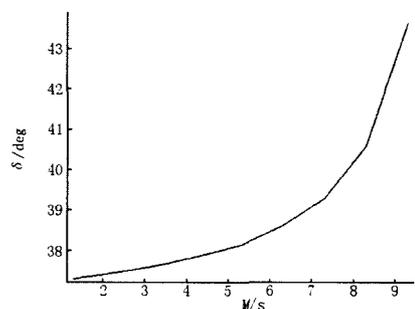


图6 送端系统惯性时间常数与系统摇摆角的关系

Fig.6 Relationship between inertia time constant of sending system and relative angle

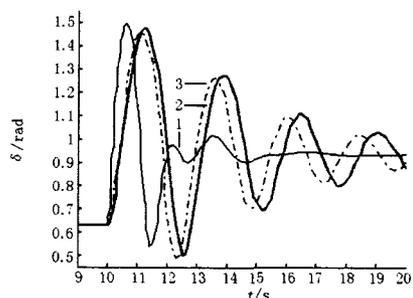


图7 系统摇摆角变化曲线

Fig.7 Relative angles

图 7 中, 受端系统惯性时间常数不变, 曲线 1 的送端系统惯性时间常数为 9.3 s, 曲线 2 的受端系统惯性时间常数为 6.3 s, 曲线 3 的受端系统惯性时间常数为 1.3 s。在相同的故障条件下, 当受端系统惯性时间常数增大时, 等值两机系统摇摆角增大, 且摇摆时间增长, 则表示暂态稳定水平下降。

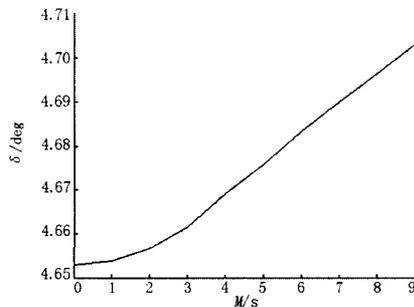


图 8 送端系统惯性时间常数与暂态稳定极限值的关系  
Fig.8 Relationship between inertia time constant and limit of transient stability

综上所述, 系统惯量的增加并不都是有利的。对于任一输电断面而言, 两端系统机组的增减都将影响其稳定极限的大小; 而任一发电机机组惯量的变化, 又将影响到不同断面的稳定水平变化, 因此转动惯量在电网互联中影响是不可忽视的。

### 3 多机系统

#### 3.1 惯性中心角参考坐标系

当扩展到多机系统后, 定义惯性中心(COI)角度为

$$\delta_{COI} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \quad (22)$$

$$\text{令 } M_T = \sum_{i=1}^n M_i \text{。}$$

COI 的运动由下式决定

$$M_T \frac{d\omega_{COI}}{dt} = \sum_{i=1}^n (P_{Mi} - P_{Ei}) = P_{COI} \quad (23)$$

以惯性中心角为参考坐标系的发电机摇摆方程

$$\frac{d^2\delta_i}{dt^2} = \frac{P_{Mi}}{M_i} - \frac{P_{Ei}}{M_i} - \frac{1}{M_T} P_{COI} \quad (24)$$

由式(23)可知, 当系统中增加或减少机组时, 系统中总惯性时间常数和惯性 COI 功率变化不大, 即  $\frac{P_{COI}}{M_T}$  可看作常数, 因此, 多机系统转子运动方程

和等值两机系统一致。

#### 3.2 仿真验证

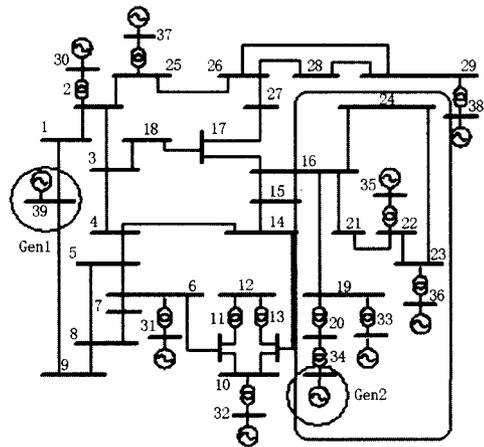


图 9 IEEE-39

Fig.9 IEEE-39

在 IEEE-39 节点系统中, 设置三相短路故障, 不改变系统初始潮流、故障位置、切除时间及各发电机惯性时间常数, 只改变平衡节点处发电机的惯性时间常数, 比较与平衡机 Gen1 功角摇摆最大的发电机 Gen2 的仿真结果, 如图 10 所示。

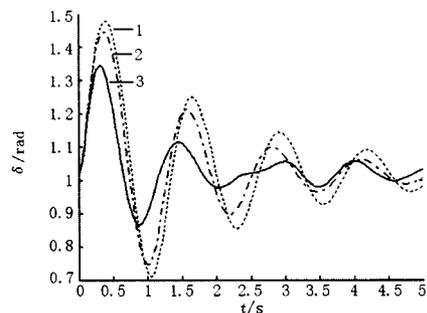


图 10 发电机 Gen1 与 Gen2 的摇摆曲线

Fig.10 Swing curves of Gen1 and Gen2

图 10 中, 曲线 1 表示 Gen1 惯性时间常数为 10 s, 曲线 2 表示 Gen1 的惯性时间常数为 8 s, 3 表示 Gen1 的惯性时间常数为 6 s, 从图中可以看出, 相对与故障断面, 发电机 Gen1 处于受端, 当 Gen1 惯性时间常数增加时, 系统中摇摆最剧烈的两台发电机摇摆幅度加大, 不利系统稳定。在不改变系统其它参数的情况下, 只改变处于送端的发电机 Gen6 的惯性时间常数, 得到图 11, 随着 Gen6 的惯性时间常数的增加, 其结果与图 10 相反。

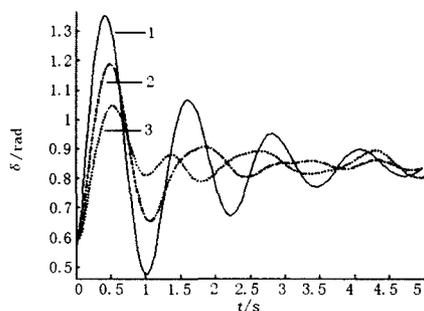


图 11 发电机 Gen 1 与 Gen2 的摇摆曲线

Fig.11 Swing curves of Gen1 and Gen2

#### 4 结论

大区域电网弱互联后, 系统稳定性水平不仅与整个系统机组的惯量和有关, 而且与系统两侧机组各自惯量的大小有关, 系统两侧机组惯量的变化直接影响两侧系统相对角的变化过程, 从而影响系统暂态稳定水平。

系统惯量越大, 则发电机角度变化速度越慢, 在相同的切除时间下, 转动惯量越大, 则切除角度越小。送端系统转动惯量提高, 此发电机群角度变化速度越慢, 而受端系统基本不变, 在相同故障切除时刻, 系统两端相对角变小, 从而提高了系统暂态稳定性; 受端系统转动惯量提高, 此发电机群角度变化的速度越慢, 而送端系统基本不变, 此时系统两端相对角变大, 从而降低了系统暂态稳定水平。

因此, 增加机组虽有利于提高系统稳定性水平, 但对具体线路或断面稳定水平而言, 不一定是有利的。

#### 参考文献

- [1] 王宗义, 郭志忠. 远距离输电断面暂态稳定极限的影响因素分析[J]. 中国电力, 2006, 39(8): 29-32.  
WANG Zong-yi, GUO Zhi-zhong. Analysis on Factors Influencing Transient Stability Limits of Long-distance Transmission Profile[J]. Electric Power, 2006, 39(8): 29-32.
- [2] 吴政球, 陈辉华, 唐外文, 等. 以单机等面积稳定判据

分析多机系统暂态稳定性[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 48-52.

WU Zheng-qiu, CHEN Hui-hua, TANG Wai-wen, et al. Using Single Machine Equal Area Criterion to Analyze Multi-machine Systems Stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 48-52.

- [3] 高询, 吴涛. 电网交流互联对系统暂态稳定性的影响[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 21-26.

GAO Xun, WU Tao. Influence of AC Network Interconnection on Power System Transient Stability[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 21-26.

- [4] 徐征雄. 东北与华北交流互联后电网内部暂态稳定水平变化分析[J]. 中国电力, 2003, 36(2): 28-31.

XU Zheng-xiong. Theoretical Analysis on Effect of Northeast-North China Power System Interconnection on Transient Stability Levels of Two Power Systems[J]. Electric Power, 2003, 36(2): 28-31.

- [5] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6-11.

YU Yi-xin, LI Peng. The Impact of Weak Interconnection of Bulk Power Grids to Damping and Dynamic Stability of Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 6-11.

- [6] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

Kundur P. Power System Stability and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

收稿日期: 2008-09-09; 修回日期: 2008-11-24

作者简介:

寇凌岳(1983-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: koulingyue@126.com

艾欣(1964-), 男, 博导, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制, 电力系统安全防御与恢复控制。