

影响特高压大电源外送系统送电能力的敏感因素

覃波,李兴源,胡楠,李宽

(四川大学电气信息学院,四川成都 610065)

摘要: 推导了考虑送端机组特性的单机带负荷系统的等效阻尼系数公式并对其进行分析。分析结果表明,系统的阻尼特性主要受相对转子角和电气距离影响,等效阻尼系数与两者均成反比。利用 PSASP 软件对锡盟特高压外送大电源系统和锦界—府谷超高压大电源外送系统进行仿真验证,仿真结果验证了理论推导的正确性,表明在 $N-1$ 或者 $N-2$ 运行状态下,大电源外送系统比普通电源外送系统更易出现动态失稳。根据理论分析和仿真结果,给出了大电源外送系统的运行建议。

关键词: 特高压输电; 大电源系统; 低频振荡; 阻尼; 电气距离; 送电功率; 敏感因素; 稳定性

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.025

0 引言

我国是一个能源分布极不均衡的国家,西北主要以煤矿为主,而西南的水力资源丰富,这种分布的不平衡决定了我国能源资源必然要进行大规模、远距离的输送^[1-4]。所以未来的一段时间里我国的西南和西北地区将出现一些大型甚至巨型电站,可将这些巨型电站统称为大电源。与传统常规电源相比,这些大电源因具有外送容量大、传输距离远等特点而逐渐引起人们的关注。未来的几十年里,国家电网也将建成以交流 1000 kV 为骨干网架的交流特高压电网以满足这种大电源系统的外送。

已有大量的文献对大电源的相关问题进行了研究。文献[5]对大电源接入系统的方式以及接入系统应遵循的相关原则进行了详细的研究;文献[6]对 750 kV 系统以及大电源接入对昌吉实际电网的影响进行了研究,并对电网的适应能力进行了评价;文献[7]根据对称短路电流计算公式,对大电源不对称接入方式引起的短路电流升高的影响进行了分析,并提出了有效限制短路电流的大电源接入点选择原则。

对于特高压大电源外送系统,如何保证其送电能力是需关注的另一个重要问题。特高压大电源外送系统自然传输功率大^[8-10],当系统出现 $N-1$ 故障时,在极端情况下系统会发生区间低频振荡甚至导致系统出现动态失稳的情况,这将严重制约特高压外送系统的送电能力^[11-14],同时也会影响系统的抗干扰能力。本文从特高压大电源外送系统输电能力的制约

因素出发,主要从电网一次侧进行考虑,重点分析了传输功率和电气距离这 2 个敏感因素对大电源特高压外送系统的影响。

本文首先以考虑了送端特性的单机系统模型为例^[15-17],对具备一定送电功率的系统的等效阻尼系数进行理论分析推导,得到外送系统接入电网时产生的区间低频振荡的主要影响因素,推导结论揭示了系统阻尼随相对转子角以及线路的阻抗等因素变化的一般规律;同时分别对实际的锡盟特高压外送大电源系统以及超高压锦界—府谷外送系统进行仿真,仿真结果表明大电源外送系统与一般的电源外送系统类似,系统的阻尼特性都会随着系统相对转子角差以及系统电气距离的增加而减弱;最后,定量改变两系统的传输功率,对系统的正常运行和非正常运行情况进行仿真比较分析,得到了影响大电源外送系统阻尼特性的敏感因素,并在此基础上通过仿真分析给出了大电源外送系统建设的意见。这些结论也为实际的大电源工程提供了一定的理论基础,具有较好的实际工程应用价值。

1 单机系统等效阻尼系数的推导

以考虑送端以及线路特性的单机带负荷系统为例对直接外送系统的等效阻尼特性进行推导。图 1 给出了单机系统的等价模型。图中, U 、 δ 分别为机端电压幅值和相角; X_T 为变压器电抗; X_L 为负荷电抗; U_L 、 θ 分别为负荷侧电压幅值、相角。

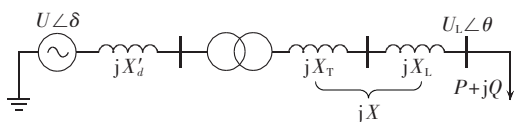


图 1 单机系统等价模型

Fig.1 Equivalent model of single-machine system

由发电机机组定子绕组内部电路可得定子电流和回路电压方程分别为:

收稿日期:2013-11-07;修回日期:2014-09-10

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011-AA05A119);国家电网公司大电网重大专项资助项目课题(SGCC-MPLG001(003-027)-2012)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011-AA05A119) and Major Projects of State Grid Corporation of China(SGCC-MPLG001(003-027)-2012)

$$\begin{cases} I_d = \frac{1}{X'_d} (E'_q - U_q) \\ I_q = \frac{1}{X_q} U_d \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_d = X_q I_q \\ U_q = E'_q - X'_d I_d \end{cases} \quad (2)$$

其中, I_d 、 I_q 和 U_d 、 U_q 分别为定子电流和回路电压的直轴、交轴分量; X'_d 为机组直轴暂态电抗; X_q 为机组交轴同步电抗; E'_q 为机组交轴暂态电势。

为了简化计算,本文忽略线路损耗,可得到发电机机端的直轴电流和交轴电流为:

$$\begin{cases} I_d = \frac{U_q}{X} - \frac{U_L \cos(\delta - \theta)}{X} \\ I_q = \frac{U_d}{X} - \frac{U_L \sin(\delta - \theta)}{X} \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)可得到:

$$\begin{cases} U_d = -\frac{U_L \sin(\delta - \theta)}{X - X_q} \\ U_q = \frac{E'_q - X'_d \cos(\delta - \theta)}{X + X'_d} \end{cases} \quad (4)$$

再将式(4)代入式(1)中,整理可得:

$$\begin{cases} I_d = \frac{1}{X'_d} \left[E'_q - \frac{E'_q - X'_d U_L \cos(\delta - \theta)}{X} \right] \\ I_q = -\frac{U_L \sin(\delta - \theta)}{X_q (X - X_q)} \end{cases} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可分别得到回路电压和定子电流的增量表达式为:

$$\begin{cases} \Delta U_d = -\frac{U_L \cos(\delta - \theta)}{X - X_q} \Delta \delta \\ \Delta U_q = \frac{1}{X + X'_d} \Delta E'_q + \frac{X'_d U_L \cos(\delta - \theta)}{X + X'_d} \Delta \delta \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta I_d = \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X + X'_d} \right) \Delta E'_q - \frac{X'_d U_L \sin(\delta - \theta)}{X + X'_d} \Delta \delta \\ \Delta I_q = -\frac{U_L \cos(\delta - \theta)}{X_q (X - X_q)} \Delta \delta \end{cases} \quad (7)$$

为了便于分析,发电机模型采用考虑了励磁特性的三阶简化模型^[18-19]:

$$\begin{cases} \tau'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{fd} - E_q \\ M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - K_D(\omega - 1) \\ \frac{d\delta}{dt} = \Delta \omega \end{cases} \quad (8)$$

其中, ω 为机组转子角速度; M 为转子惯性常数; K_D 为机组转子阻尼系数; P_m 为机组输入的机械功率; P_e 为机组输出的电磁功率; E_q 为机组交轴同步电势; E_{fd} 为与励磁电势对应的定子侧直轴等效电势; τ'_{d0} 为直轴暂态时间常数。

对式(8)进行线性化处理,可得:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta E'_q}{dt} = \frac{1}{\tau'_{d0}} (\Delta E_{fd} - \Delta E_q) \\ \frac{d\Delta \omega}{dt} = \frac{1}{M} (-\Delta P_e - K_D \Delta \omega) \\ \frac{d\Delta \delta}{dt} = \Delta \omega \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中的机组电磁功率 P_e 以及机组交轴电势 E_q 可分别表示为:

$$P_e = E'_q I_q - (X'_d - X_q) I_d I_q \quad (10)$$

$$E_q = E'_q + (X_d - X'_d) I_d \quad (11)$$

同时励磁系统的传递函数可以表示为:

$$\frac{\Delta E_f}{-\Delta U} = \frac{K_e}{1 + \tau_e s} \quad (12)$$

其中, ΔE_f 为励磁电势增量; s 为微分算子; K_e 为励磁系统的增益; τ_e 为励磁系统时间常数; ΔU 为机组机端电压增量,机端电压 $U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}$ 。

分别对式(10)~(12)进行线性化处理,可得:

$$\Delta P_e = E'_q \Delta I_q + \Delta E'_q I_q - (X'_d - X_q) (I_d \Delta I_q + \Delta I_d I_q) \quad (13)$$

$$\Delta E_q = \Delta E'_q + (X_d - X'_d) \Delta I_d \quad (14)$$

$$\frac{d\Delta E_{fd}}{dt} = \frac{1}{\tau_e} (-\Delta E_{fd} - K_e \Delta U) \quad (15)$$

同时将式(6)和式(7)中的相应增量关系代入式(13)~(15)中有:

$$\begin{cases} \Delta P_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \\ \Delta E_q = K_4 \Delta \delta + K_3 \Delta E'_q \\ \Delta U = \frac{1}{U} [X_d X_q \Delta I_q + U_q (\Delta E'_q - X'_d \Delta I_d)] = \\ K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \end{cases} \quad (16)$$

$$K_1 = \frac{X_d U_L \sin(\delta - \theta)}{X + X'_d} [E'_q + (X'_d - X_q)] +$$

$$\frac{I_d (X'_d - X_q) U_L \cos(\delta - \theta)}{X - X_q}$$

$$K_2 = [E'_q - (X'_d - X_q) I_q] \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X + X'_d} \right) + I_q$$

$$K_3 = \frac{X_d}{X'_d} - \frac{X_d - X'_d}{X + X'_d}$$

$$K_4 = -\frac{X'_d (X_d - X'_d) U_L \sin(\delta - \theta)}{X + X'_d}$$

$$K_5 = \frac{X_d'^2 U_L \sin(\delta - \theta)}{U (X + X'_d)} - \frac{X_q U_d U_L \cos(\delta - \theta)}{U (X - X_q)}$$

$$K_6 = \frac{U_q}{U} - \frac{X}{U (X + X'_d)}$$

由式(16)可得,以 $\Delta \delta$ 、 $\Delta \omega$ 、 $\Delta E'_q$ 、 ΔE_f 为状态变量的机组线性化状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta \delta} \\ \dot{\Delta \omega} \\ \dot{\Delta E'_q} \\ \dot{\Delta E_f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_D}{M} & -\frac{K_1}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ 0 & -\frac{K_4}{\tau'_{d0}} & -\frac{K_3}{\tau'_{d0}} & \frac{1}{\tau'_{d0}} \\ 0 & -\frac{K_e K_5}{\tau_e} & -\frac{K_e K_6}{\tau_e} & -\frac{1}{\tau_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_f \end{bmatrix} \quad (17)$$

由式(17)可以得到与之对应的 Philips-Heffron 模型如图 2 所示,以及考虑励磁系统反馈作用的机组在振荡模态角频率 ω_a 处的简化阻尼转矩增量如式(18)所示。

$$\Delta M_a = \frac{K_2 (K_4 + K_5 K_e) \tau'_{d0}}{(K_6 K_e)^2 + (\omega_a \tau'_{d0})^2} \quad (18)$$

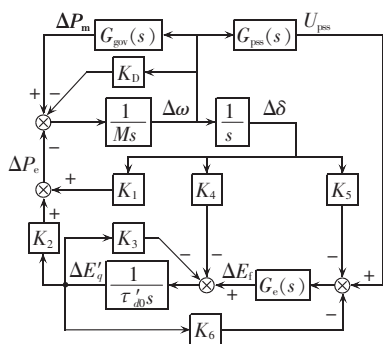


图 2 系统 Philips-Heffron 模型结构图
Fig.2 Structure of Philips-Heffron model

在分析影响阻尼的因素时,由于参数较多,不利于分析主次影响因素,可以对表达式进行适当的简化和变形处理,同时将参数 K_1-K_6 的表达式代入式 (18) 后可得等效阻尼系数的表达式为:

$$D'_d = \frac{K_2 \sqrt{H_1^2 + H_2^2} \sin(\delta - \theta + \theta_h)}{\frac{(K_6 K_e)^2}{\tau_{d0}'} + \omega_a^2 \tau_{d0}'} \quad (19)$$

$$H_1 = \frac{[K_e X_d' - U X_d'(X - X_d')] U_L}{U(X + X_d')}$$

$$H_2 = \frac{K_e X_q U_L}{U(X - X_q)}$$

$$\theta_h = \begin{cases} \arctan \frac{H_2}{H_1} & H_1 > 0 \\ \pi + \arctan \frac{H_2}{H_1} & H_1 < 0 \end{cases}$$

由于发电机和励磁系统的参数已经选定,不能轻易更改,所以本文主要从一次系统规划的角度研究系统的等效阻尼系数的主要影响因素。

因大电源系统送电功率大且线路结构单一,故 X 和 $\delta-\theta$ 较大,而 D'_d 的直接影响因素为 H_1 、 H_2 以及 $\sin(\delta-\theta+\theta_h)$ 。影响 H_1 、 H_2 的主要一次参数为线路的电抗 X ,而影响 $\sin(\delta-\theta+\theta_h)$ 大小的参数为送电功率以及线路的电抗 X 。对于大电源外送系统, $\delta-\theta+\theta_h$ 的值在第 2 象限和第 3 象限的变化, $\sin(\delta-\theta+\theta_h)$ 的变化趋势是单调递减的。单一结构的系统的线路阻抗与系统的电气距离成正比关系,随着电气距离的增大, H_1 、 H_2 会减小, $\delta-\theta+\theta_h$ 会增大,故系统的等效阻尼系数会相应减小甚至变为负值,从而削弱系统阻尼甚至造成机组负阻尼;同时相对相位角的大小也与系统的联络线传输功率紧密相关,随着传输功率的增大, $\delta-\theta+\theta_h$ 会增大,系统的等效阻尼系数同样会减小甚至变为负值。因此,在大电源外送系统的传输功率和传输距离范围内,系统的等效阻尼系数近似与系统电气距离和送电功率成反比。

2 算例仿真

2.1 测试算例

内蒙古锡盟特高压外送系统和陕西锦界—府谷

超高压外送系统均为具备一定功率的直接电源外送系统,受端电网为坚强的大电网,符合本文的假设条件。在 PSASP 仿真软件中分别搭建锡盟特高压外送系统和锦界—府谷超高压外送系统的等值模型,在理论验证的基础上探究低频振荡对大电源外送系统与常规电源外送系统影响的差异。

锡盟特高压外送系统的电压等级为 1000 kV,送端网络为四区域,共 10 台发电机组,每台发电机都安装有 PSS;外送系统通过 2 条并联的 1000 kV 特高压线路向北京和济南电网送电,其中北京电网和济南电网分别用等值系统 1 和等值系统 2 来表示,线路上总的输送功率约为 7000 MW。锦界—府谷超高压外送系统电压等级为 500 kV,送端的 2 个发电厂共 5 台发电机,每台发电机都安装有 PSS;每台发电机都通过 3 条 500 kV 的并联线路由冀忻向冀石北送电,受端系统用等值机表示,线路总的传输功率约为 2600 MW。两系统的接线示意图见图 3、4。

2.2 仿真实验分析

2.2.1 小干扰稳定分析

对锡盟特高压外送系统和锦界—府谷超高压系统分别进行小扰动分析。对于锡盟特高压外送系统,在查干母线至锡盟母线传输线路首端设置单相短路接地故障,故障起始时间为 10 s 时,持续 0.1 s,图 5 给出了锡盟母线至北京母线间的某条联络线上的传输有功功率振荡情况(纵轴为标么值,后同)。

表 1 给出了锡盟特高压系统的 2 个主要振荡模式,分别为等值系统 1 与等值系统 2 之间的区域振荡模式以及锡盟特高压系统与系统之间的地区振荡模式。由于 PSS 的存在,系统的 2 个振荡模式都具有较好的阻尼,本文主要考虑的是锡盟特高压系统与系统之间的区间振荡模式。

对于锦界—府谷超高压外送系统,在锦界 51 至晋忻都 51 的一回线路上同样设置单相短路接地故障,故障起始时间为 10 s 时,持续时间为 0.1 s,图 6 给出了晋忻都 51 至冀石北一回联络线路上的有功功率振荡情况。锦界—府谷超高压外送系统的送端系统与受端等值系统之间的区间振荡模式频率为 0.927 Hz,振荡阻尼很强,为 0.151。

通过对两系统的小扰动分析可知,两系统中都存在区间振荡模式,这表明大电源外送系统与普通电源外送系统在接入电网时也会引起低频振荡问题,但是由于发电机中的 PSS 的存在,两系统都具有较好的阻尼特性。

2.2.2 传输功率(相对相角差)对系统阻尼特性的影响分析

系统联络线传输功率的大小与系统的相对转子角 $\delta-\theta+\theta_h$ 大小成比例关系。首先研究系统相对转子角大小的改变对系统阻尼特性的影响,设定两外

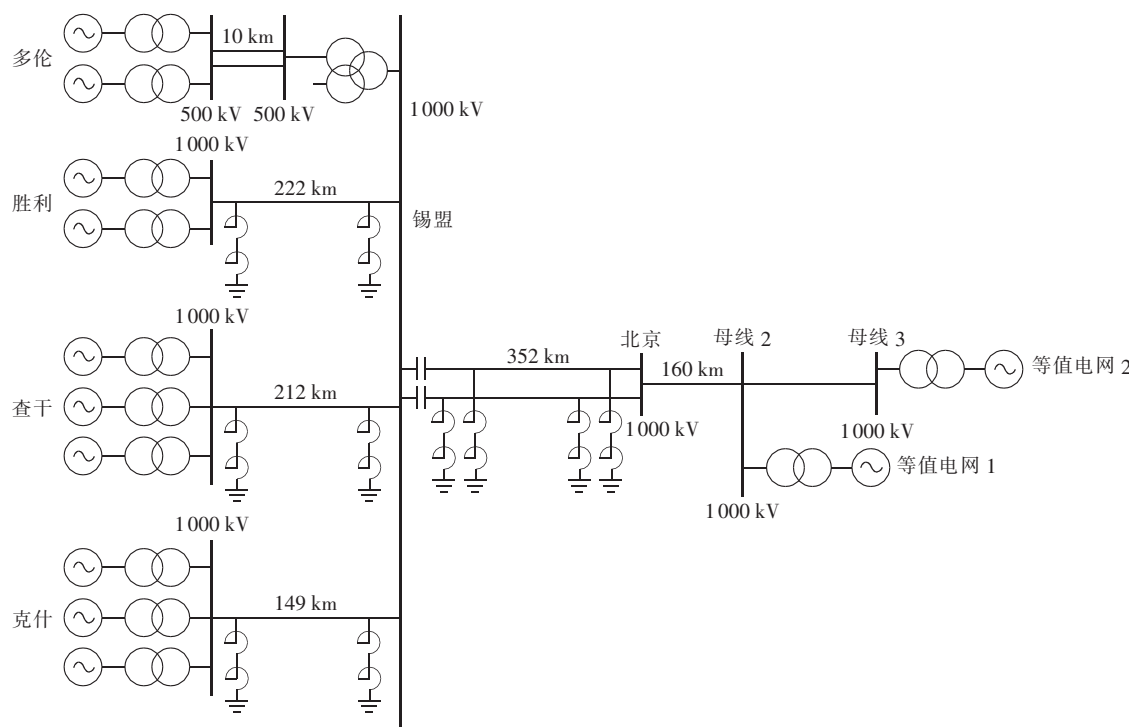


图 3 锡盟特高压外送大电源系统接线示意图

Fig.3 Wiring diagram of Ximeng large-scale UHV power supply system

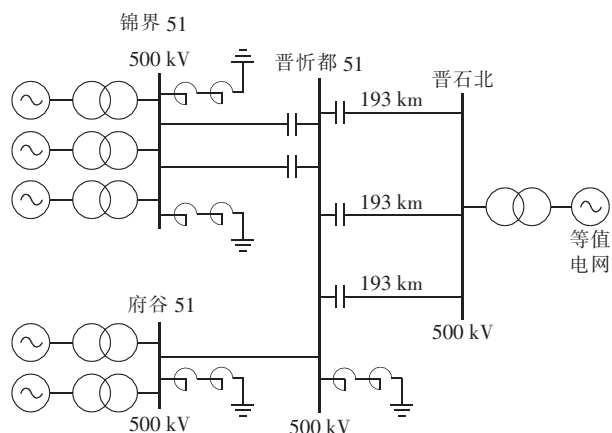


图 4 锦界—府谷特高压外送大电源系统接线示意图

Fig.4 Wiring diagram of Jinjie-Fugu large-scale UHV power supply system

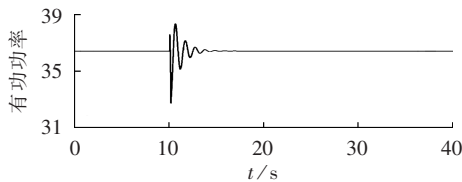


图 5 锡盟特高压外送大电源系统单条联络线有功功率振荡情况

Fig.5 Active power oscillation of a tie line of Ximeng large-scale UHV power supply system

表 1 锡盟特高压外送大电源系统主要振荡模式
Table 1 Main oscillation modes of Ximeng large-scale UHV power supply system

振荡模式	振荡频率/Hz	阻尼比	说明
等值系统 1-等值系统 2	0.188	0.1300	很强阻尼
锡盟特高压外送系统-系统	0.826	0.0684	强阻尼

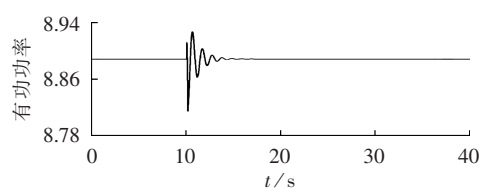


图 6 锦界—府谷特高压外送大电源系统单条联络线有功功率振荡情况

Fig.6 Active power oscillation of a tie line of Jinjie-Fugu large-scale UHV power supply system

送系统的电气距离不变,只改变它们的送电功率大小与运行状况,图 7 给出了系统正常运行与 $N-1$ 单线运行状况下锡盟特高压外送系统的阻尼特性随传输功率变化的情况,图 8 给出了正常状况、 $N-1$ 运行以及 $N-2$ 运行状况下锦界—府谷超高压外送系统的阻尼特性随送电功率的变化情况。

从图 7、8 中可以看出,不论是锡盟外送系统还是锦界—府谷外送系统,系统的阻尼特性都会随着送

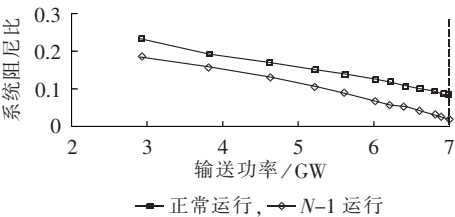


图 7 锡盟特高压外送大电源系统在正常运行以及 $N-1$ 运行方式下系统传输功率与系统阻尼的关系

Fig.7 Relation between transmission power and system damping of Ximeng large-scale UHV power supply system in normal and $N-1$ operating modes

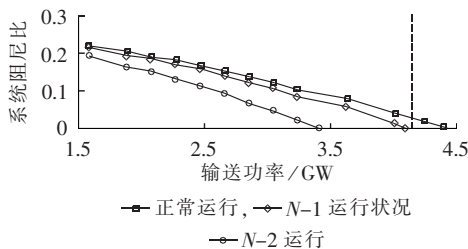


图 8 锦界—府谷特高压大电源外送系统在正常运行、N-1 以及 N-2 运行方式下系统传输功率与系统阻尼的关系

Fig.8 Relation between transmission power and system damping of Jinjie-Fugu large-scale UHV power supply system in normal, N-1 and N-2 operating modes

电功率的增大而相应减弱,且两者基本呈线性关系。同时,两系统在各运行状态下都满足阻尼特性的这一变化规律,并且两系统正常运行时的阻尼比大于非正常运行时的阻尼比。对于锡盟外送系统,若系统运行在 N-1 方式下,系统传输功率达到 7000 MW 时,系统的阻尼就已经为负值,系统达到了功率传输极限,远小于系统正常运行时的功率传输极限;对于锦界—府谷外送系统,系统在正常运行状态下,系统的功率传输极限可以达到 4500 MW,而系统运行在 N-1 方式和 N-2 方式时,系统的传输极限相应地降低到 4 141 MW 和 3 478 MW,较正常运行情况要小得多。

2.2.3 电气距离对系统阻尼特性的影响分析

从推导得到的等效阻尼系数表达式中可以看出,系统的阻尼特性同样也与系统的电气距离有关。本节通过改变两系统联络线的线路阻抗参数的大小来验证此推论的正确性。

分别设定两系统的传输功率为 7 000 MW 和 2 663 MW,然后仅改变系统联络线的阻抗以及系统的运行方式来观察系统阻尼特性的变化。图 9、10 分别给出了两系统不同运行状况下系统的阻尼特性随系统电气距离的变化情况。

从图 9、10 可以看出,两系统的阻尼比均会随着系统电气距离的增大而相应减弱,而且阻尼比和电气距离之间也大致呈线性关系,并且两系统在不同

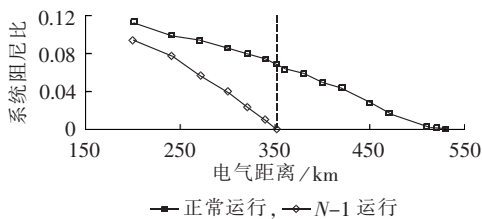


图 9 锡盟特高压外送大电源系统在正常运行以及 N-1 运行方式下系统电气距离与系统阻尼的关系

Fig.9 Relation between electrical distance and system damping of Ximeng large-scale UHV power supply system in normal and N-1 operating modes

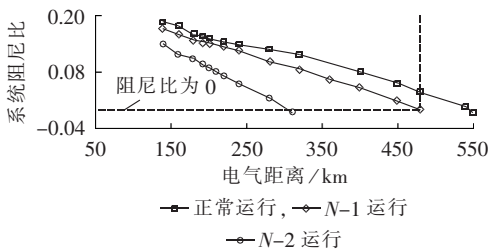


图 10 锦界—府谷特高压外送大电源系统在正常运行、N-1 以及 N-2 运行方式下系统电气距离与系统阻尼的关系

Fig.10 Relation between electrical distance and system damping of Jinjie-Fugu large-scale UHV power supply system in normal, N-1 and N-2 operating modes

运行状态下都符合这一变化规律。从图 9、10 还可以看出,系统正常运行情况下能够承受的最大电气距离较系统在 N-1 或者 N-2 运行状态下要大得多。对于锡盟外送系统,系统正常运行时,系统能够承受的最大电气距离为 520 km,而 N-1 运行方式下则只有 360 km;对于锦界—府谷系统,系统正常运行、N-1 和 N-2 运行方式下所能承受的最大电气距离分别为 550、482 和 321 km。由此可验证系统线路电气距离的变化对系统阻尼特性影响的推论的正确性。

综合电气距离和送电功率的变化与系统阻尼特性的关系可知,系统正常运行时,系统网架结构较稳定,但是随着 N-1 甚至 N-2 断线故障的出现,使得系统联络线减少,这相当于增大了系统线路阻抗,则电气距离增大,而从图 9、10 中可知,电气距离的增大会导致系统阻尼变弱。这也解释了在 N-1 或者 N-2 运行状态下系统传输功率以及系统所能够承受的最大电气距离较系统正常运行时要小的原因。

2.2.4 大电源特性分析

下面分别对两系统正常运行和非正常运行时系统的送电功率进行定量改变,然后观察两系统阻尼比的变化量,并进行比较分析。表 2、3 分别给出了两系统正常运行和非正常运行时系统的阻尼比随系统传输功率定量改变的变化情况。

从表 2 可以看出,锡盟外送系统正常运行时系统

表 2 锡盟及锦界—府谷特高压外送大电源系统正常运行时系统功率定量变化与系统阻尼的关系

Table 2 Relation between quantitative transmission power change and system damping of Ximeng and Jinjie-Fugu large-scale UHV power supply systems in normal operating conditions

输送功率	系统阻尼比	
	锡盟外送系统	锦界—府谷外送系统
降低 20%	0.1077	0.1920
降低 10%	0.0978	0.1757
降低 5%	0.0791	0.1652
正常	0.0682	0.1552
提高 5%	0.0631	0.1456
提高 10%	0.0564	0.1351
提高 20%	0.0292	0.1134

表 3 锡盟及锦界—府谷特高压外送系统非正常运行时系统功率定量变化与系统阻尼的关系

Table 3 Relation between quantitative transmission power change and system damping of Ximeng and Jinjie-Fugu large-scale UHV power supply systems in abnormal operating conditions

输送功率	系统阻尼比		
	锡盟 N-1 运行	锦界—府谷 N-1 运行	锦界—府谷 N-2 运行
降低 20%	0.073 50	0.182 80	0.146 3
降低 10%	0.040 10	0.163 00	0.123 1
降低 5%	0.022 60	0.152 40	0.110 6
正常	-0.000 42	0.143 09	0.096 8
提高 5%	失稳	0.130 60	0.082 1
提高 10%	失稳	0.119 20	0.067 4
提高 20%	失稳	0.093 30	0.037 2

阻尼较锦界—府谷外送系统要小,但是定量改变系统送电功率时,锡盟外送系统阻尼变化量较锦界—府谷外送系统的阻尼变化量要大得多。当锡盟外送系统的功率降低或提高 20% 时,它的阻尼比则相应增加了或者减少了 57% 左右,较之锦界—府谷系统的阻尼比的变化量 24% 要大得多,由此可知,大电源外送系统的输送功率是影响系统阻尼变化的敏感因素。

从表 2、3 的数据分析可知,两系统运行于非正常的 N-1 或者 N-2 方式时,系统阻尼特性受系统送电功率的影响相比于系统正常运行时更敏感。同时比较锦界—府谷外送系统在 N-1 和 N-2 运行方式下的系统阻尼比可知,系统网架结构越弱,系统的阻尼特性受系统功率变化的影响越大。

结合前文对电气距离与系统阻尼的影响分析及表 3 中的数据可知,当锡盟外送系统断开 1 条联络线而单线运行时,相当于增大了系统的电气距离即削弱了系统网架结构而导致系统的阻尼减弱,系统在这种情况下不能保持稳定运行,但是对于锦界—府谷外送系统,系统即使是在断开 2 条联络线的情况下仍然能够保持稳定运行,并且具有不弱的阻尼特性。

通过以上的仿真分析可以得到满足系统动态稳定性条件下系统送电敏感因素对系统阻尼影响的稳定区域,即图 7—9 中虚线左侧区域及图 10 中 2 条虚线和纵轴所围区域。

由图 7—10 可以看出,在系统 N-1 运行方式下,大电源外送系统输送功率和电气距离这 2 个敏感因素均已在满足正常阻尼的安全区域外;而普通电源外送系统输送功率和电气距离完全可满足系统的正常阻尼。因此,大电源外送系统相对普通电源外送系统,其输送功率和电气距离均已在正常运行的安全区域以外,会使实际系统在 N-1 运行方式下出现负阻尼振荡的动态失稳情况。

2.2.5 大电源特性工程建议

通过以上的仿真分析可知,对于锡盟大电源外送系统,当系统双线正常运行时,系统的送电功率为 7000 MW,系统具有较强的阻尼特性。在受端电网需求不变乃至增大时,如将锡盟大电源外送系统的送电功率提高到规划的自然送电功率 8000 MW,系统双线运行的阻尼比为 0.041 6,仍能够满足系统运行特性。但是当锡盟外送系统断开 1 条联络线而以 N-1 方式运行时,如欲保持系统单线运行送电功率为 8 000 MW,则必须增强系统的网架结构,由仿真分析可知,将电气距离由原来的 352 km 降低到 245 km 可达到要求,但是对于已建成的系统该方法并不合适,可以通过增加 1 条联络线来达到增大系统的阻尼比的目标,增加联络线的效果等同于降低系统的电气距离,但是该方案经济性太差。对于已建成的锡盟大电源外送系统,采用 FACTS 装置来达到增强系统阻尼特性具有更好的可行性和经济性。

综合以上的分析,对于锡盟外送系统等大电源系统,系统处于正常运行状态时,具有较强的阻尼特性,但是大电源系统的阻尼特性对系统送电功率以及电气距离较敏感,导致系统不能正常运行在 N-1 方式下。

因此,实际的大电源系统的建设应该首先充分考虑基站与接入电网的距离以及大电源系统总的送电功率的大小。对于距离接入电网较近的大电源系统,可以在保证系统能正常运行在 N-1 方式的情况下适当增大传输功率,以充分发挥系统传输线路的利用效率;如果大电源系统距离接入电网较远,同时系统的传输功率也较大时,必须增强系统的网架结构,以锡盟外送系统为例,可以通过增加 1 条联络线以保证系统在 N-1 状态下仍具有较强的阻尼特性。总体而言,对于实际的大电源外送系统,在一次系统规划时,为满足受端负荷,应尽量保证送电功率足够支撑受端负荷的需求。在此基础上,系统在 N-1 运行方式下必须要具有一定的阻尼,减少输电距离和增加输电线回数成为设计规划中需考虑的问题,对于大电源系统最好选择距离接入电网较近的基站,这样既可以保证大电源系统的送电功率,同时还能节约经济成本。在一次系统完全确定或不易更改的情况下,大电源系统仍出现阻尼不足而导致系统送电功率受限的现象时,建议增设 FACTS 等二次设备来进一步增强系统阻尼,从而达到提高系统的输送能力的目的。

3 结论

我国能源的不均匀分布必将导致一些大型电源的出现,大电源系统接入电网与常规电源系统接入

电网一样也会产生低频振荡等问题。本文首先在考虑送受端特性的单机带负荷系统上进行系统等效阻尼系数的理论推导,并通过锡盟外送大电源系统与锦界—府谷外送系统仿真对比分析,揭示了大电源系统与一般的系统类似,系统的阻尼特性都会随着系统送电功率以及系统电气距离的增加而减弱,同时相比于一般电源外送系统,大电源接入系统网架结构较弱,系统的阻尼特性对系统送电功率以及系统电气距离的变化更加敏感,必须采取相应的措施以保证系统即使在 $N-1$ 运行方式下也能具有较好的阻尼特性。

本文的研究是在实际系统的基础上进行仿真完成的,同时本文给出了一些关于大电源系统接入电网时应注意的问题和相应的解决措施,为实际大电源系统的应用提供了理论依据,具有较好的实际工程应用价值。

参考文献:

- [1] 中国电力科学研究院. 我国特高压输电技术和经济可行性研究[R]. 北京:中国电力科学研究院,2004.
- [2] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京:科学出版社,2010:177-1874.
- [3] 王仲鸿. 交流特高压在中国应用的经济和安全分析研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(10):1-4.
WANG Zhonghong. Economy and security analysis of AC UHV in China[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(10):1-4.
- [4] 印永华,郭强,张运洲,等. 特高压同步电网构建方案论证及安全性分析[J]. 电力建设,2007,28(2):1-4.
YIN Yonghua, GUO Qiang, ZHANG Yunzhou, et al. Scheme study and safety analysis of UHV synchronous power grid composition[J]. Electric Power Construction,2007,28(2):1-4.
- [5] 秦晓辉,宋云亭,赵良,等. 大电源接入系统方式的比较[J]. 电网技术,2009,33(17):64-69.
QIN Xiaohui, SONG Yunting, ZHAO Liang, et al. Comparative research on grid-connection modes for huge power supplies[J]. Power System Technology,2009,33(17):64-69.
- [6] 周霄,宋云亭,田建设,等. 750 kV 系统及大电源接入对昌吉电网的影响[J]. 中国电力,2012,45(1):10-14.
ZHOU Xiao, SONG Yunting, TIAN Jianshe, et al. Impacts of the access of 750 kV system and super-power source on Changji Power Grid[J]. Electric Power,2012,45(1):10-14.
- [7] 周吉安,靳丹,王维洲,等. 大电源接入方式对短路电流的影响分析[J]. 电工电能新技术,2012,31(1):48-51.
ZHOU Ji'an, JIN Dan, WANG Weizhou, et al. Analysis of influence of huge power supplies grid-connection modes on short-circuit current[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2012,31(1):48-51.
- [8] 刘新东,陈焕远,姚程. 基于非线性方法抑制特高压联络线功率波动的控制策略仿真[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):92-95.
LIU Xindong, CHEN Huanyuan, YAO Cheng. Simulation of power strategy based on nonlinear for UHV tieline[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):92-95.
- [9] 熊虎,向铁元,詹昕,等. 特高压交流输电系统无功与电压的最优控制策略[J]. 电网技术,2012,36(3):34-39.
XIONG Hu, XIANG Tieyuan, ZHAN Xin, et al. An optimal control strategy of reactive power and voltage for UHVAC power transmission system[J]. Power System Technology,2012,36(3):34-39.
- [10] 曾庆禹. 1000 kV 特高压输电系统输电能力研究[J]. 电网技术,2012,36(2):1-6.
ZENG Qingyu. Study on power transmission capability of 1000kV ultra high voltage transmission system[J]. Power System Technology,2012,36(2):1-6.
- [11] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M]. 本书翻译组,译. 北京:中国电力出版社,2002:762-782.
- [12] 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 power system low-frequency oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):98-101.
- [13] WANG Jiaming, LIU Wenying, XIE Chang. Notice of retraction research on damping characteristics of Xinjiang-Northwest Power Grid before and after interconnection[C]//2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference(APPEEC). Chengdu, China:IEEE,2010:1-5.
- [14] 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.
- [15] BARBIER C, FERRARI E, JOHANSSON K E. Questionnaire on electromechanical oscillation damping in power systems report on the answers[J]. Electra,1979(64):59-82,84-90.
- [16] CHEN Xiangyi, LI Chunyan, WANG Yunli. Analysis of the inter-area low frequency oscillations in large scale power systems[C]//2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications(ICIEA). Beijing, China:IEEE,2011:1627-1631.
- [17] 王青,马世英. 电力系统区间振荡的阻尼与区域间送电功率关系特性[J]. 电网技术,2011,35(5):40-45.
WANG Qing, MA Shiying. Relationship between inter-area oscillation damping in power system and inter-area transmitted power[J]. Power System Technology,2011,35(5):40-45.
- [18] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:252.
- [19] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京:中国电力出版社,2007.

作者简介:



覃波

覃波(1988—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail:qinbo880818@126.com);

李兴源(1945—),男,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,IEEE高级会员,从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电等研究。

基于时标量测的电网实时预警关键技术方案

赵家庆¹,唐 胜²,钱科军¹,田 辉²,丁宏恩¹,周 绮²,俞 瑜¹,李 春¹,王 鼎¹

(1. 国网苏州供电公司,江苏 苏州 215004;2. 江苏瑞中数据股份有限公司,江苏 南京 210003)

摘要: 时序数据库使记录带时标量测数据成为可能,因此提出了基于时标量测的电网实时预警方案。该方案包含 4 个核心技术点,即系统数据的分流处理、脚本驱动的告警规则定义与执行、基于运行历史数据挖掘的运行状态预测告警、告警结果精细化的展示以及多样化的辅助决策分析,实现了电网模型数据与时标量测的实时数据、历史数据融合应用,解决了电网量测跳变难以捕捉、告警准则单一、电网运行异常时缺乏预警手段等问题。所提方案在实际工程中的应用结果表明,其提高了预警系统的准确性和有效性。

关键词: 电网; 调度自动化; 预警系统; 实时数据库; 时标量测; 模型; 数据融合; 数据处理

中图分类号: TM 734

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.026

0 引言

随着“大运行”体系的不断推进,电网规模日益扩大^[1-2],对电网安全运行以及供电可靠性的需求也越来越高^[3-4],而告警系统作为监视、保障电网安全运行的重要工具,在电网调度监控中起着举足轻重的作用^[5]。

近年来,国内外针对电网安全告警开展了相关研究并取得了一定的进展^[6]。文献[6]从故障分析的角度分层分类别阐述了智能告警的内涵并对智能告警发展趋势进行了深入分析。另外在智能告警或预警应用方向也有相关的研究;文献[7]总结了国内外预警系统的现状,提出了一种大电网安全可靠运行的分级梯度预警预控方法;文献[8]围绕智能告警、故障诊断和故障恢复等方面研究实现了服务地区电网的智能调度辅助决策系统;文献[9]通过可视化提升、图形扩展以及多系统数据关联等手段开发了

在线可视化预警调度系统;文献[10-11]阐述了电网动态监测专业下的预警与辅助决策系统的功能,分析其应用效果并进行了功能展望;文献[12]则在电力系统静态安全分析的方向上,采用基于电压稳定指标的模糊聚类数学方法实现以节点载荷能力为核心的电压稳定指标预警分析方法。

上述智能告警、预警的研究成果大多是在当前调度运行系统模式下,提出的解决告警系统某个或某类问题的方法或思想,是对电网智能化安全运行的重要探索和实现,在当前主流的调度自动化系统中能够满足基本的告警分析需求,为电力生产运行提供了较全面可靠的支撑。但是上述研究成果中电网调度系统大多基于关系数据库,其存储精度为分钟级,导致在告警判断分析时,很难获取电网真实的秒级历史数据,即告警判断缺乏全面的数据支撑,难以完成瞬时告警的捕捉、历史时刻告警的回溯分析,且不能有效利用电网全息的海量历史数据进行实时

收稿日期:2013-10-25;修回日期:2014-08-26

Sensitive factors affecting transmission capacity of large-scale UHV power supply system

QIN Bo,LI Xingyuan,HU Nan,LI Kuan

(School of Electrical Engineering and Information,Sichuan University,Chengdu 610065,China)

Abstract: The formula of equivalent damping coefficient considering the characteristics of sending-terminal is deduced and analyzed for single-machine system with load. The analytical results show that,the relative rotor degree and the electrical distance are the main factors affecting the damping characteristics of system and the equivalent damping coefficient is inversely proportional to both of them. Simulations are carried out in PSASP for Ximeng and Jinjie-Fugu large-scale UHV power supply systems,which,verifying the correctness of theoretical analysis,show that,the large-scale power supply system under $N-1$ or $N-2$ operating state grows the dynamic unstability much easier than the normal power supply system. Suggestions for the operation of large-scale power supply system are given according to the theoretical analysis and simulative results.

Key words: UHV power transmission; large-scale power supply system; low-frequency oscillation; damping; electrical distance; transmitted power; sensitive factors; stability