

基于特高压输电系统的安徽电网小干扰稳定研究

结合1 000 kV安徽—华东特高压投产后安徽电网2014~2015年的网架结构,对2014~2015年安徽电网小干扰稳定性进行了详细分析比较。得出随着电网规模的扩大和特高压投运后,安徽电网小干扰稳定性的发展态势,指出特高压和安徽电网中电厂群的电力系统稳定器(Power System Stabilizer, PSS)配置是抑制特高压送端机组和安徽电网机组低频振荡的必要手段。

张旭昶 戴申华 罗亚桥 张 璐/安徽省电力科学研究院



张旭昶/工程师

2013年底,安徽—华东特高压(以下简称“特高压”)交流输电示范工程投产,安徽省内袁庄电厂1期、平圩电厂2期共计254万kW容量机组经两台变压器接至特高压淮南变电站,经过皖南变电站送入浙北变电站和沪西变电站,形成华东电网的特高压主干网架。2014~2015年将有约700万kW装机容量接入安徽电网,同时特高压电网送电端电厂群装机容量也将增至近600万kW,2015年淮南—南京第2条同塔双回特高压线路也将投运,安徽电网将成为整个华东电网的一个巨大送端,这种情况的出现势必会引起低频振荡现象的发生。

采用中国电力科学研究院的PSD—BPA程序对2014~2015年安徽电网及特高压电厂群进行小干扰稳定分析,找出可能引起电网低频振荡的原因及模式,并找出相应的解决措施。

关键词/Keywords

安徽电网·
特高压·
小干扰稳定分析·
电力系统稳定器·

研究基础

1. 电网及模型

采用PSD—BPA电力系统计算分析软件,基于1 000 kV特高压及安徽电网网架

现状,建立安徽电网BPA计算模型,其中淮南—皖南—浙北—沪西1 000 kV特高压模型采用分布参数线路模型,两端各接有高压电抗器进行补偿,安徽电网研究水平年为2014~2015年,为了保证小干扰稳定研究的准确性,模型中对华东电网其他部分模型仍然采用详细数据模型,所有机组参数也同样采用实测参数。

(1) 发电机模型

由于涉及到电网的小干扰稳定计算,尤其涉及PSS投运等,因此发电机模型均采用6阶详细模型,发电机及励磁系统参数均选取实测参数。

(2) 线路模型

特高压线路模型采用分布参数线路模型,考虑两端补偿设备。华东电网内500 kV和220 kV线路模型均采用集中参数线路模型。

(3) 负荷模型

除福建电网外,华东电网区域内的负荷模型均采用“40%恒阻抗+60%恒功率模型”,不考虑负荷的频率效应。福建电网的负荷模型采用“60%恒阻抗+40%恒功率模型”,同时考虑负荷的频率特性(有功频率特征系数为1.2,无功频率特征系数为2.0)。

2. 小干扰稳定性分析

PSD—BPA电力系统计算分析软件作为成熟的电力系统分析程序,针对大规模电力系统分析,其采用的是改进Arnoldi小干扰分析方法,改进Arnoldi法具有较好的收敛性,特别是在针对大规

模电力系统分析时,能够较好地解决大规模电力系统计算特征值的困难。改进的Arnoldi算法是一种降价计算法,通常将高阶矩阵转化为Hessenberg矩阵,即一个上三角矩阵。诸如发电机等系统中动态元件的线性化状态方程可表示为

$$\Delta \mathbf{x}_i = \mathbf{A}_i \Delta \mathbf{x}_i + \mathbf{B}_i \Delta \mathbf{U} \quad (1)$$

$$\Delta \mathbf{i}_i = \mathbf{C}_i \Delta \mathbf{x}_i - \mathbf{Y}_i \Delta \mathbf{U} \quad (2)$$

式(1)、式(2)为系统中每个动态元件的线性化状态方程。式中, x_i 为动态元件的状态变量; U 为动态元件的端电压; i_i 为动态元件注入系统网络的电流。

如果将系统中所有动态元件线性化方程结合在一起,就形成了全系统状态方程

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{A}_D \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}_D \Delta \mathbf{U} \quad (3)$$

$$\Delta \mathbf{i} = \mathbf{C}_D \Delta \mathbf{x} - \mathbf{Y}_D \Delta \mathbf{U} \quad (4)$$

式中, $\Delta \mathbf{x}$ 为全系统状态向量的列矩阵; $\mathbf{A}_D$ 、 $\mathbf{C}_D$ 为针对于各个动态元件 $\mathbf{A}_i$ 、 $\mathbf{C}_i$ 形成的分块对角矩阵; $\mathbf{B}_D$ 、 $\mathbf{Y}_D$ 则形成对应于动态元件端电压的列矩阵,除了其对应的动态元件端电压或对应于控制远端电压的元素为非零外,其余均为零。

系统中的线路、变压器等组成的网络用导纳矩阵表示

$$\Delta \mathbf{i} = \mathbf{Y}_N \Delta \mathbf{U} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{Y}_N$ 为网络中的导纳矩阵。

在改进的Arnoldi法中,将所有的状态相量用电压来表示,最终形成系统的状态方程^[3],写成矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}_D - \lambda_i \mathbf{I} & \mathbf{B}_D \\ \mathbf{C}_D & -(\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{U}_i \\ \mathbf{q}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{v}_i \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{q}_i = (\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D)^{-1} \mathbf{C}_D \mathbf{U}_i \quad (7)$$

$$(\mathbf{A}_D - \lambda_i \mathbf{I}) \mathbf{U}_i + \mathbf{B}_D \mathbf{q}_i = \mathbf{v}_i \quad (8)$$

同时在改进的Arnoldi算法中,采用了迭代法来求矩阵的左特征相量,对应于所计算的特征值 λ_i ,即将式(6)两边进行转置,转置后的状态方程为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}_D^T - \lambda_i \mathbf{I} & \mathbf{C}_D^T \\ \mathbf{B}_D^T & -(\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D)^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{y}_0 \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (9)$$

对式(9)进行一次迭代后即可求出左特征相量。

特高压线路的自然功率与电压分布

1. 特高压线路输送的自然功率

输电线路自然功率又称波阻抗负荷,指的是输电线路的负荷端每相接入一个波阻抗时的负荷。输电线路输送的自然功率是用于比较不同电压等级输电线路的输电能力和分析电压无功调节措施的重要指标之一。

淮沪工程中淮南-皖南双回线路的自然功率和广义自然功率如表1所示。

表1 淮南-皖南输电双回线路的自然功率和广义自然功率

	1 000 kV	1 050 kV	1 100 kV
自然功率/MW	2×4 219	2×4 651	2×5 105
广义自然功率/MW	2×3 345	2×3 688	2×4 048

从表1中可以看出,考虑线路高压电抗器的广义自然功率约为自然功率的79%。特高压输变线路的运行电压越高,自然功率和广义自然功率就越大。如果线路两侧母线电压提高5%,自然功率和广义自然功率均会提高10%。

2. 特高压输电线路的沿线电压分布

在实际运行中,特高压输电线路沿线电压分布并不均匀。特高压线路沿线电压分布与特高压输送功率水平以及线路两侧的500 kV电压水平等因素相关。

特高压线路沿线电压要求控制在1 000~1 100 kV之间,为保证特高压线路沿线电压运行在这一范围内,需要将特高压线路沿线各站母线电压控制在一定范围内。

以淮南-皖南特高压线路为例,其长度为340 km,在不同送端和受端电压下,线路各点电压及线路两端不同电压条件下沿线电压分布如图1所示。

特高压对安徽电网小干扰稳定性的影响

电力系统小干扰稳定是指系统受到小干扰后不发生自发振荡或非周期性失步,自动恢复到起始运行状态的能力。系统小干扰稳定性取决于系统的固有特性,与扰动的大小无关。

2013年底,安徽-华东特高压交流输电示范

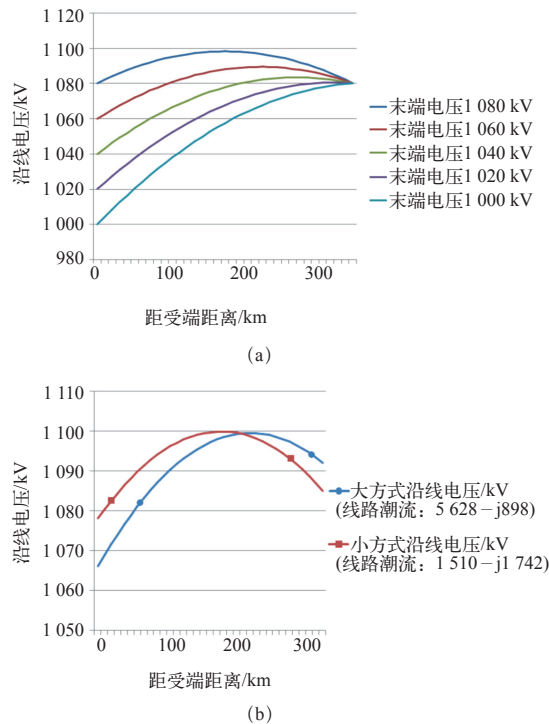


图1 不同运行方式下的特高压线路沿线电压分布

工程投产，安徽省内袁庄电厂1期、平圩电厂2期共计254万kW容量机组经两台变压器接至特高压淮南变电站，经皖南变电站送入浙北变电站和沪西变电站，形成华东电网的特高压电网。

结合安徽电网特高压投产后2014~2015年的安徽电网网架结构，计算2014~2015年安徽电网小干扰稳定，找出安徽电网小干扰稳定性的发展态势和抑制低频振荡的方法。

1. PSS投运前的振荡模式

特高压投运后，按特高压及安徽电网内所有机组均未投PSS，而华东电网其他省份按已投入PSS计算，安徽电网主要相关负阻尼及弱阻尼（阻尼比低于0.03）振荡模式参数如表2所示。图2~图5分别为振荡模式1~4模态图。

表2 安徽电网所有机组均未投PSS，安徽电网主要相关振荡模式参数

序号	实部	虚部	频率/Hz	阻尼比	机电回路相关比
1	0.427	6.264	0.996 9	-0.068	5.315 7
2	0.069 6	4.044 9	0.643 8	-0.017 2	3.526 8
3	0.048 2	6.556 7	1.043 5	-0.007 4	10.555 9
4	0.020 9	6.224 1	0.990 6	-0.003 4	7.144 3

(续)

序号	实部	虚部	频率/Hz	阻尼比	机电回路相关比
5	-0.053 8	7.502 3	1.194	0.007 2	11.350 9
6	-0.068 1	7.086 6	1.127 9	0.009 6	10.577 8
7	-0.070 8	7.415 8	1.180 3	0.009 6	11.401 8
8	-0.110 6	7.536 7	1.199 5	0.014 7	11.878 9
9	-0.169 8	7.768 1	1.236 3	0.021 8	11.603 9
10	-0.204 7	7.485 5	1.191 4	0.027 3	14.937 4

从表2中可以看出，振荡模式1~4均为负阻尼振荡模式，呈现典型的失稳振荡，从振荡模式1~4的模态图可以看出，振荡模式1（ $0.427 \pm j6.264$ ）与安徽境内平圩电厂3[#]、4[#]机组和袁庄电厂1[#]~4[#]机组等强相关。这6台机组均在2014年接入特高压线路。针对该模式，这6台机组基本同调，该模式为特高压电网与华东电网的区域间振荡模式。

振荡模式2（ $0.069 6 \pm j4.044 9$ ）与安徽省内大量机组强相关，为安徽电网与华东电网区域间振荡模式。振荡模式3（ $0.048 2 \pm j6.556 7$ ）与马鞍山电厂、马鞍山电厂2期和华六电厂2期等机组强相关，是地区振荡模式，需要在这些电厂机组配置PSS。振荡模式4（ $0.020 9 \pm j6.224 1$ ）与安徽机组强相关，是安徽电网的地区振荡模式，表现为安徽北部部分电厂机组如虎山电厂、宿东电厂、宿州电厂、淮二电厂和临涣电厂与南部机组如宣城电厂、铜陵电厂5[#]机组、永丰电厂、芜湖电厂、华六电厂2期、天门山电厂和马鞍山电厂等机组之间的振荡，需要在上述机组配置PSS。

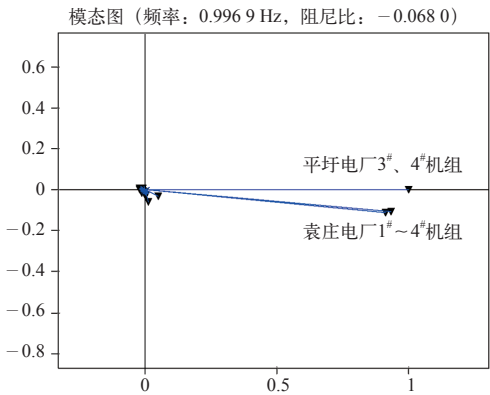


图2 振荡模式1（ $0.427 \pm j6.264$ ）模态图

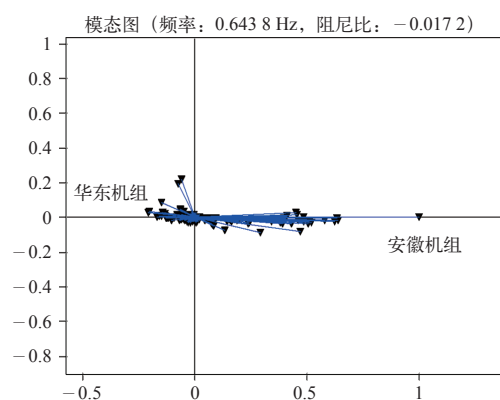


图3 振荡模式2 ($0.0696 \pm j4.0449$) 模态图

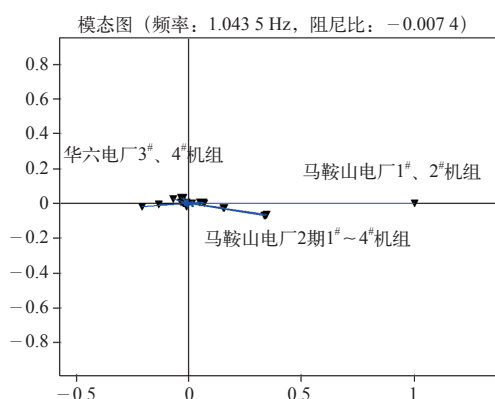


图4 振荡模式3 ($0.0482 \pm j6.5567$) 模态图

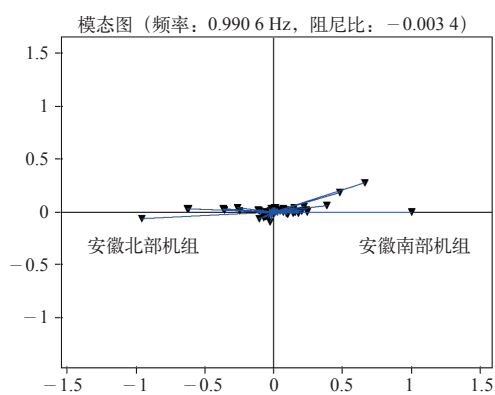


图5 振荡模式4 ($0.0209 \pm j6.2241$) 模态图

2. PSS投运后的振荡模式

计及安徽电网内所有已完成PSS试验的机组，并投入PSS，规划投产的机组采用相类似机组的励磁系统及PSS模型参数，并投入PSS，华东电网其他省份有PSS数据的机组投入PSS，计算得出安徽电网主要相关振荡模式参数如表3所示。从表3中可以看出，在所有机组均投入PSS的情况下，系统

阻尼特性得到大幅度改善，小干扰稳定性大大提高，不存在阻尼比低于0.03的振荡模式。

表3 安徽电网所有机组均投PSS，安徽电网主要相关振荡模式

参数					
序号	实部	虚部	频率/Hz	阻尼比	机电回路相关比
1	-0.443 2	11.913 7	1.896 1	0.037 2	26.504 6
2	-0.536 7	10.750 2	1.710 9	0.049 9	17.126 9
3	-0.250 7	4.952 8	0.788 3	0.050 6	16.066 7
4	-0.445 8	8.636 6	1.374 6	0.051 5	7.847 7
5	-0.284 3	5.474 7	0.871 3	0.051 9	8.818 8
6	-0.581 3	11.118 5	1.769 6	0.052 2	19.151 5
7	-0.610 3	11.340 7	1.804 9	0.053 7	18.608 1
8	-0.554 1	10.257 2	1.632 5	0.053 9	7.049 2
9	-0.570 6	10.426 6	1.659 4	0.054 6	9.291 7
10	-0.277	3.893 7	0.619 7	0.071	1.864
11	-0.404 3	5.553 4	0.883 9	0.072 6	11.346 7
12	-0.546 8	6.026 2	0.959 1	0.090 4	1.739 7
13	-0.671 5	6.994 1	1.113 2	0.095 6	10.325 7
14	-0.698	6.740 4	1.072 8	0.103	9.673
15	-0.599 4	5.681 4	0.904 2	0.104 9	1.886 6

结束语

随着特高压的投运，特高压送端电厂群将有600万kW机组接入，同时安徽电网在2014~2015年将有700万kW容量机组接入皖北电网，安徽电网将成为华东电网的巨大送端，这种情况势必引起机组间的低频振荡。通过中国电力科学研究院PSD-BPA程序中的小干扰稳定分析模块，结合特高压投运后的运行特点，对安徽电网2014~2015年小干扰稳定性进行研究，得出特高压投运后安徽电网小干扰稳定性的特点。

1) 特高压建成后，分流了大量500 kV电压等级联络线输送功率，有利于提高安徽至华东区域间振荡模式的阻尼比。

2) 在特高压送端机组及安徽电网内机组投入PSS前，存在4个负阻尼模式，这些负阻尼模式主要由特高压机组相对华东电网的区域间振荡模式、安徽机组相对于华东电网区域间振荡模式，以及安徽电网江南、江北机组之间的区域间振荡模式构成，同时安徽电网区域内也分别存在多个

(下转第47页)

参考文献

- [1] 周敏, 刘艳. 计及火电机组启动过程的网架并行恢复策略 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (10): 30-34, 93.
- [2] Wei Sun, Chen-Ching Liu, Li Zhang. Optimal generator start-up strategy for bulk power system restoration [J]. IEEE Transactions on Power System, 2011, 26 (3): 1357-1366.
- [3] A.Ketabi, H.Asmar, A.M.Ranjbar, et al. An approach for optimal units start-up during bulk power system restoration [C]. Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, 2001: 190-194.
- [4] 陈海燕. 大停电后初期网架恢复序列的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [5] 刘强, 石立宝, 周明, 等. 电力系统恢复中机组恢复的优化选择方法 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (3): 164-170.
- [6] 刘强, 石立宝, 周明, 等. 电力系统恢复控制的机组优化启动策略 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (4): 1-5.
- [7] 董张卓, 焦建林, 孙启宏. 用层次分析法安排电力系统事故后火电机组恢复的次序 [J]. 电网技术, 1997, 21 (6): 48-51, 54.
- [8] 贺星棋, 刘俊勇, 杨可, 等. 基于模糊矢量投影的机组优化恢复策略 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42 (4): 165-169.
- [9] 张志毅, 陈允平, 袁荣湘. 系统重构阶段机组最优恢复次序的模糊多属性决策法 [J]. 电工技术学报, 2007, 22 (11): 153-157.
- [10] Zhong Huirong, Gu Xueping. Determination of optimal unit start-up sequences based on fuzzy AHP in power system restoration [C]. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011: 1541-1545.
- [11] 林济铿, 李童飞, 赵子明, 等. 基于熵权模糊综合评价模型的电力系统黑启动方案评估 [J]. 电网技术, 2012, 36 (2): 115-120.
- [12] 侯福均, 吴祈宗. 混合互补判断矩阵一致性研究 [J]. 数学的实践与认识, 2005, 35 (4): 46-55.
- [13] 刘雨华. 基于梯形模糊数的指标权重确定方法的应用研究 [J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2009, 1 (4): 369-372.
- [14] 牟琼, 杨春德. 一种基于梯形模糊数互补判断矩阵确定权重的方法 [J]. 重庆邮电学院学报: 自然科学版, 2006, 18 (6): 809-812.
- [15] 李荣钧. 模糊多准则决策理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

(收稿日期: 2014-03-10) EA

(上接第41页)

弱阻尼的地区振荡模式。

3) 在所有机组投入PSS后, 小干扰稳定性满足标准要求, 说明机组投入PSS后有利于抑制振荡, 尤其对于特高压机组以及安徽省内的机组, 具有良好的振荡抑制。对于省内机组的地区振荡模式, 投入相关机组的PSS后均能有效地提高阻尼比。同时投入相应机组的PSS后, 安徽电网内也不存在弱阻尼的地区振荡模式。

4) 通过上述研究, 建议今后的工作中应通过试验以确定特高压送端机组及安徽电网新投运机组的PSS参数, 以便有效地提高特高压送端机组及

安徽电网内机组的抗干扰能力。

参考文献

- [1] 仲悟之, 宋新立, 汤涌, 等. 特高压交直流电网的小干扰稳定性分析 [J]. 电网技术, 2010, 34 (3): 1-4.
- [2] 顾丽鸿, 周孝信, 严剑峰, 等. 特高压联网区域实时小干扰稳定分析策略 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (13): 1-7.
- [3] 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.

(收稿日期: 2014-03-20) EA