

基于厂用电负荷修正模型的火电机组进相能力仿真

汤 奕¹,戴玉臣¹,陈 斌¹,汪成根²

(1. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;2. 江苏省电力公司科学研究院,江苏 南京 211103)

摘要: 为了解决传统机组进相能力确定方法偏差较大、试验工况单一的问题,提出一种基于厂用电静态负荷模型的火电机组进相能力仿真方法。首先基于实际电厂运行数据,采用参数辨识方法提出厂用电静态负荷的修正模型;然后在 PSD-BPA 软件平台中搭建厂用电模型,仿真测试不同运行工况下,厂用电达到电压限值或机组达到静态稳定极限时的发电机进相深度。算例采用某百万机组 2013 年 6 月至 2015 年 6 月的实测数据,仿真计算了该机组的进相能力,并与进相试验实测数据进行了比较,结果表明了所提方法的有效性和合理性。

关键词: 火电机组; 进相能力; 厂用电负荷; 静态负荷模型; 仿真测试

中图分类号: TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.12.010

0 引言

发电机进相运行是系统重要的调压手段之一,其调压效果好、操作方便^[1-5]。工程中通过机组进相运行试验来确定机组的进相能力,其结果受试验时系统电压水平的影响,存在进相深度不足、无法适用于不同运行工况的问题。随着制造工艺的提升,火电机组进相能力主要受静态稳定极限和厂用电电压等约束^[1-2]。机组进相运行时,励磁电流的减小会引起发电机的功角增大,逼近发电机组的静态稳定极限,限制机组的进相深度^[6];同时,进相运行会导致机端电压显著下降,严重影响厂用电负荷^[7],甚至可能造成失负荷从而影响机组稳定运行。

目前针对发电机进相能力的研究主要有数学模型法、仿真分析法和试验结果拟合法^[8]。数学模型法是通过建立各种数学模型来计算发电机的进相能力。文献[6,9]研究了静态稳定极限对机组进相深度的影响;文献[10]基于发电机组工况参数模型建立机组进相模型,文献[11]采用单机无穷大系统模型计算机组的进相能力,但如何根据发电机的实际工况建立准确的数学模型,尚缺乏深入研究。仿真分析法是通过仿真平台建立进相试验仿真模型来测

试极限条件下的进相深度。文献[12-13]采用 RBF 神经网络、支持向量机等智能算法来建立进相能力模型,但这些方法对数据的要求较高;文献[8]采用相关向量机理论来分析机组的进相能力,其对小样本处理效果更好,具有较高的泛化能力。

综上所述,数学模型法和仿真分析法虽然考虑了静态稳定极限、机组参数、机组运行工况对进相能力的影响,但未能深入研究厂用电电压对进相能力的影响。最新进相试验表明^[7,14],机组进相运行时厂用电电压偏低已成为限制机组进相深度的主要因素。厂用电电压模型包括 3 个方面^[11]:机端电压、高厂变参数和厂用电负荷模型。传统进相能力模型采用的厂用电负荷模型为定负荷模型,与实际厂用电负荷的误差较大。而试验结果拟合法虽不依赖于数学模型,但拟合结果的准确性对试验数据的完备性要求较高,特别是对于新建电厂和改造电厂而言,存在数据缺失导致无法准确拟合的可能性。

本文在 PSD-BPA 仿真平台中,基于实际工况数据建立准确的厂用电负荷修正模型,综合考虑静态稳定裕度和厂用电电压等因素影响,测试不同的系统电压水平、机组运行工况和厂用电负荷工况下火电机组的进相能力,并通过仿真算例来验证本文所提仿真方法的准确性和有效性。

1 厂用电负荷静态模型

厂用电负荷的大小是高厂变压降的决定性因素之一,与厂用电母线电压密切相关。因此,只有建立准确的厂用电负荷模型,才能精确地计算厂用电电压,从而保证进相能力仿真的精度。文献[15]提出厂用电负荷静态模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} P = P_N U^{0.08} (1 + 2.9 \Delta f) \\ Q = P_N \tan(\arccos 0.8) U^{1.6} (1 + 1.8 \Delta f) \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2015-11-26;修回日期:2016-09-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577030);国家自然科学基金国际合作与交流项目(51561145011);国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015AA050202);国家电网公司项目(XT71-15-045);江苏省电力公司科技项目(5210-EF14001P)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577030),the Funds for International Cooperation and Exchange of the National Natural Science Foundation of China(51561145011),the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2015-AA050202),Project of SGCC(XT71-15-045) and the Science and Technology Program of State Grid Jiangsu Electric Power Company(5210EF14001P)

其中, P 和 Q 分别为厂用电负荷的有功功率和无功功率; P_N 和 Q_N 分别为厂用电负荷的额定有功功率和无功功率; U 为厂用电母线电压标幺值; Δf 为频率偏差的标幺值。

表 1 为某电厂实测厂用电负荷数据, 根据式(1) 所得计算结果与实测数据最大偏差超过了 8%, 存在较大偏差。因此, 需要根据厂用电负荷的特性, 对式(1) 进行修正和改进。

表 1 实测厂用电负荷数据
Table 1 Measured auxiliary power data

序号	机组有功/ MW	电压/ kV	频率/ Hz	厂用电 有功/MW	厂用电 无功/Mvar
1	618.8	27.15	50.034	24.68	20.91
2	651.2	27.13	50.029	26.09	21.98
3	630.0	27.14	50.029	25.60	21.92
4	626.5	27.13	50.031	25.79	21.33
5	612.1	27.13	50.034	24.96	20.95
6	637.9	27.13	50.028	25.40	21.15
7	664.7	27.14	50.026	26.00	21.92
8	688.1	27.13	50.034	24.83	20.59

1.1 厂用电负荷特性

火电厂主要的厂用电中压负荷如图 1 所示, 锅炉和汽机系统的用电量占全厂的 70% 以上^[16]。

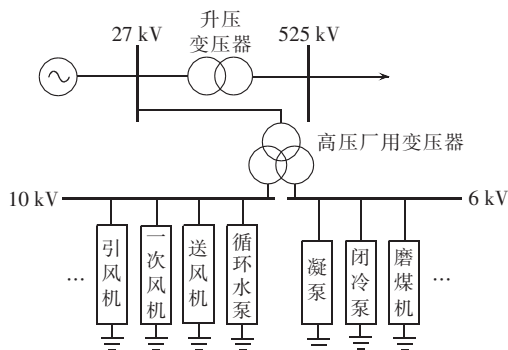


图 1 厂用电中压负荷示意图

Fig.1 Schematic diagram of mid-voltage loads of auxiliary power

锅炉系统中最大的负荷是一次风机、送风机和引风机。一次风机、送风机和引风机的负荷大小与机组所需的煤粉量、燃烧所需要的空气、产生的烟气的量有着直接的关联。以某百万机组为例, 不同机组出力时一次风机和送风机的负荷特性如图 2 所示

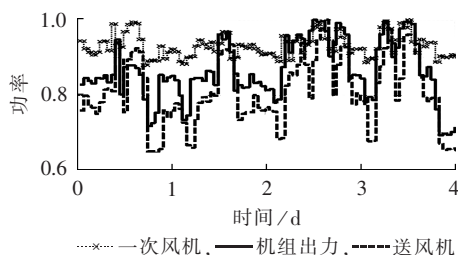


图 2 一次风机和送风机的负荷特性

Fig.2 Load characteristics of primary fan and blower

(图中功率为标幺值)。一次风机和送风机负荷与机组有功出力的波动趋势一致。但机组有功出力的波动滞后于一次风机和送风机的波动, 即接收到调度指令后, 一次风机和送风机会先做出调整, 机组出力需要一段时间后才能符合调度指令。

除了风机, 磨煤机也是锅炉系统中的重要负荷, 其大小取决于锅炉所需煤粉的数量, 与机组的运行工况直接相关。以百万机组为例, 不同机组出力时磨煤机负荷特性见图 3(图中功率为标幺值)。与风机相似, 磨煤机负荷与机组出力的波动趋势完全一致, 且机组出力的波动滞后于磨煤机负荷的波动。

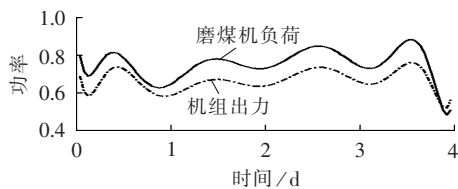


图 3 磨煤机负荷特性

Fig.3 Load characteristics of coal pulverizer

汽机系统的中压辅机主要是循环水泵、凝泵和闭冷泵, 其负荷大小通常与机组工况无关, 波动很小。以百万机组为例, 不同机组出力时循环水泵负荷特性如图 4 所示。循环水泵负荷波动范围很小, 与机组有功出力的大小没有关系, 可以认为是定负荷。

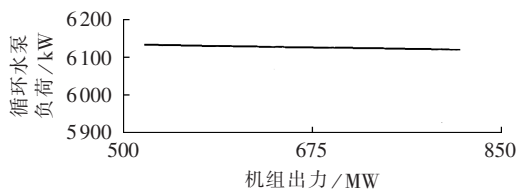


图 4 循环水泵负荷特性

Fig.4 Load characteristics of circulating water pump

1.2 厂用电负荷修正模型

由 1.1 节可知, 一次风机、送风机、引风机和磨煤机等厂用电负荷的大小与机组的有功出力存在正比例的关系, 循环水泵等汽机系统负荷是定负荷。因此, 厂用电负荷与机组出力的关系可以用幂函数来表示, 同时考虑到厂用电负荷的电压和频率静态特性, 本文基于式(1) 提出厂用电负荷模型如下:

$$\begin{cases} P = P_N P_C^\alpha U^{0.08} (1 + 2.9 \Delta f) \\ Q = Q_N P_C^\beta U^{1.6} (1 + 1.8 \Delta f) \end{cases} \quad (2)$$

其中, P_C^α 和 P_C^β 分别为厂用电负荷的有功功率和无功功率与机组有功出力的相关系数; P_C 为机组出力标幺值, 为实测数据; α 和 β 分别为厂用电负荷的有功功率和无功功率与机组有功出力的相关指数, 需要利用实测数据辨识得到。由于火电厂厂用电负荷规模庞大, 无法统计出厂用电负荷的额定有功功率 P_N 和额定无功功率 Q_N , 因此, 厂用电负荷的额定有

功率 P_N 和额定无功功率 Q_N 也需要利用实测数据辨识得到。根据某电厂 2015 年 6 月的实测数据,随机抽取 100 组数据,利用最小二乘法进行参数辨识可得厂用电负荷模型如下:

$$\begin{cases} P=30840P_G^{0.51}U^{0.08}(1+2.9\Delta f) \\ Q=24740P_G^{0.37}U^{1.6}(1+1.8\Delta f) \end{cases} \quad (3)$$

图 5 和图 6 为式(3)所得结果与实测数据的对比(图中纵轴、横轴数据均为标么值),整体误差较小,平均误差均不超过 3%。

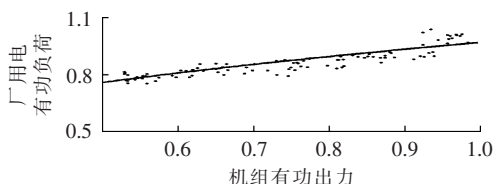


图 5 厂用电有功负荷与机组有功出力的关系

Fig.5 Relationship between active loads of auxiliary power and active power output of units

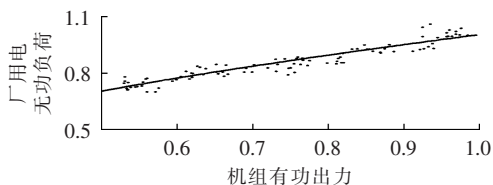


图 6 厂用电无功负荷与机组有功出力的关系

Fig.6 Relationship between reactive loads of auxiliary power and active power output of units

2 进相能力限制因素

工程中,机组进相能力是通过机组进相试验来确定的,其大小受机组的定子铁芯和端部的温升、厂用电电压、静态稳定极限等因素的影响。随着制造工艺水平的提高和端部机构的改进,定子铁芯和端部的温升已不再是制约发电机进相运行的主要因素。因此,本文提出的方法重点考虑厂用电电压和静态稳定裕度对进相能力的影响。

2.1 厂用电电压

厂用电电压已经成为约束火电机组进相深度的主要因素^[7,14]。机组进相运行时的厂用电电压与系统电压和厂用电负荷水平有关,其大小与厂用电负荷直接相关,高厂变的压降与厂用电负荷的关系如式(4)所示:

$$\begin{cases} \Delta U = \frac{PR_T + QX_T}{U_G} \\ \delta U = \frac{PX_T - QR_T}{U_G} \end{cases} \quad (4)$$

其中, ΔU 和 δU 分别为厂用电电压降落的纵向分量和横向分量; R_T 和 X_T 分别为高厂变的等效电阻值和等效电抗值。电压幅值的变化取决于 ΔU , δU 由厂用电负荷和机端电压确定。

电压降与厂用电负荷的大小成正比,厂用电负荷模型的精确性对进相仿真方法的结果具有决定性的影响。厂用电负荷模型偏大会导致压降偏大,仿真方法所得的进相深度不足;厂用电负荷模型偏小会导致厂用电电压压降偏小,实际工程中机组无法达到仿真方法所确定的进相深度。此外,根据某 1000 MW 机组的厂用电负荷实测数据,厂用电负荷的大小主要与机组出力、季节相关,具体数据请见 4.2 节。

同时,电压降与机端电压成反比,机端电压越高,电压降越小,最大机组进相深度越深。由图 1 可知,发电机组通过升压变压器向系统输送功率,因此,不考虑变压器损耗和变比时,机端电压由系统电压决定。

综上所述,厂用电电压约束包含考虑机组出力和季节因素影响的厂用电负荷修正模型及系统电压。

2.2 静态稳定裕度

机组进相运行时,静态稳定裕度变小,导致系统静态稳定水平降低。为保证系统的稳定运行,发电机组的静态稳定裕度应不低于 1.1^[17]。机组最大进相深度应满足静态稳定裕度要求,静态稳定裕度计算式如下:

$$P_{\max}/P_G = \sin(\pi/2)/\sin\delta \geq 1.1 \quad (5)$$

其中, $P_{\max}$ 为发电机组的最大有功出力; δ 为发电机组的功角。

凸极发电机的功角计算方法如下:

$$\delta = \arctan \frac{P_G X_d}{U_G^2 + Q_G X_d} \leq 70^\circ \quad (6)$$

其中, X_d 为 d 轴同步电抗。

根据式(4)~(6),机组的静态稳定水平与 3 个因素有关,分别是机组的有功出力、无功出力和机端电压。在静态稳定水平相同的情况下,机组有功出力越大,静态稳定极限所允许的最大进相深度越浅;机端电压越高,静态稳定极限所允许的最大进相深度越深。根据 2013 年 6 月至 2015 年 6 月厂用电负荷实测数据,机端电压波动在额定值的 5% 以内时对静态稳定水平影响较小。

3 机组进相能力仿真流程

传统机组进相能力主要是通过进相试验予以确定。但工程中机组进相运行时的系统电压高于进相试验时的系统电压,机组进相能力存在进一步挖掘的空间。为解决这一问题,本文基于厂用电静态负荷模型提出火电机组进相能力仿真方法,能够确定不同机组出力和不同系统电压水平下的机组最大进相深度。

本文提出的机组进相能力仿真方法利用 PSD-

BPA 潮流程序来计算在不同系统电压和不同机组有功出力下机组进相运行时的厂用电母线电压、系统电压等。总体上分为 2 步:第一步是建立厂用电负荷模型,第二步是确定最大进相深度。具体流程如图 7 所示。

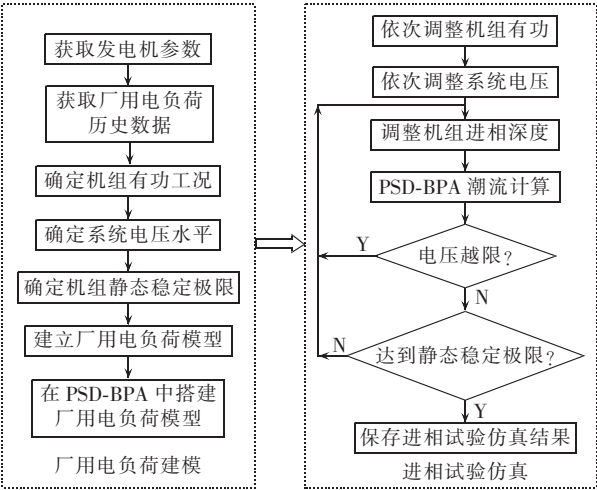


图 7 机组进相试验仿真方法流程图

Fig.7 Flowchart of simulative unit leading-phase test

确定最大进相深度时重点考虑了以下 3 个因素。

(1) 机组出力。

由发电机组功角计算式(5)和(6)可知,机组出力不同时,其功角也有所不同,进相试验仿真时确定了机组出力分别为 $0.5P_{GN}$ 、 $0.75P_{GN}$ 和 P_{GN} 对应的最大进相深度。

(2) 厂用电电压。

根据进相运行试验的相关规定^[17],厂用电母线电压不应低于额定值的 95%。在机组进相试验仿真过程中厂用电母线电压达到额定值的 95%时,此时的进相深度即为对应工况下的最大进相深度。厂用电母线的电压除了与厂用电负荷有关外,主要与系统电压相关。系统电压越高,厂用电母线的电压越高,机组的最大进相深度越深;系统电压越低,厂用电母线的电压越低,机组的最大进相深度越浅。为了确定不同系统电压水平下机组的进相深度,将系统电压水平分为 $1.02U_N$ 、 $1.03U_N$ 、 $1.04U_N$ 、 $1.05U_N$ 来进行进相试验仿真。

(3) 静态稳定极限。

根据进相试验仿真的机组出力、系统电压和式(4)一(6),可计算出对应的静态稳定极限所允许的机组最大进相深度。进相试验仿真时,若机组的进相深度达到了静态稳定极限所允许的机组最大进相深度,那么该进相深度即为该工况下机组的最大进相深度。

4 仿真算例

本文算例发电机参数采用江苏某百万机组参

数,其额定功率为 1000MW,机端电压额定值为 27 kV,直轴同步电抗为 2.18 p.u.,机组的静态稳定极限如表 2 所示。该机组的主变变比为 525 kV/27 kV,高厂变变比为 27kV/10kV/6kV。厂用电负荷模型采用第 2 节提出的模型,基于该机组 2013 年 6 月至 2015 年 6 月的时间间隔为 15 min 的厂用电数据来辨识厂用电负荷模型中的相关参数(α 、 β 和 P_N 、 Q_N)。

表 2 发电机静态稳定极限

Table 2 Static stability limits of units

序号	有功功率/MW	无功功率/Mvar	$\cos\varphi$	$\delta/(^{\circ})$
1	500	-320	-0.85	69.9
2	750	-200	-0.97	70.0
3	1000	-40	-0.999	70.0

4.1 仿真方法的精度

为检验进相能力仿真方法的精度,调整系统电压和机组出力来复现机组进相试验时的工况,并与机组进相试验实测数据对比。表 3 为进相前后 500 kV 母线、10 kV 母线和 6 kV 母线的电压对比。

表 3 进相前后电压对比

Table 3 Comparison between voltages before and after leading-phase operation

母线	机组出力/MW	数据来源	进相前电压/kV	进相后电压/kV	压降/%
500 kV 母线	500	试验	514.20	508.90	1.01
		仿真	514.21	506.86	1.40
	750	试验	515.40	510.80	0.88
		仿真	515.39	509.32	1.16
	1000	试验	512.50	510.10	0.46
		仿真	512.51	508.26	0.81
10 kV 母线	500	试验	10.69	9.73	9.60
		仿真	10.84	9.80	10.40
	750	试验	10.75	9.99	7.60
		仿真	10.97	10.05	9.20
	1000	试验	10.70	10.20	5.00
		仿真	10.87	10.28	5.90
6 kV 母线	500	试验	6.48	5.90	9.67
		仿真	6.52	5.89	10.50
	750	试验	6.51	6.03	8.00
		仿真	6.56	6.04	8.67
	1000	试验	6.49	6.20	4.83
		仿真	6.52	6.17	5.83

进相运行前,仿真方法所得的厂用电母线电压偏高,但偏差均在 2% 以内。机组进相深度相同时,仿真方法所得的 500 kV、10 kV 和 6 kV 母线电压的压降较大,偏差最大不超过 0.4%;仿真方法所得的结果精确较高,最大误差不超过 0.8%。综上所述,本文提出的进相能力仿真方法精度较高,能够作为进相试验的有效补充,为机组的进相能力提供一个参考值。

4.2 厂用电负荷对进相深度的影响

厂用电电压与厂用电负荷直接相关,厂用电负荷越大,厂用电电压降越大,机组的最大进相深度越

浅。机组出力相同时受环境因素影响,不同季度的厂用电负荷相差较大,式(7)和式(8)分别为厂用电负荷的夏季数据和冬季数据辨识所得由厂用电负荷模型。

$$\begin{cases} P=31\,565P_G^{0.2924}U^{0.08}(1+2.9\Delta f) \\ Q=25\,805P_G^{0.1639}U^{1.6}(1+1.8\Delta f) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P=26\,700P_G^{0.3416}U^{0.08}(1+2.9\Delta f) \\ Q=22\,336P_G^{0.2805}U^{1.6}(1+1.8\Delta f) \end{cases} \quad (8)$$

基于夏季厂用电负荷模型和冬季厂用电负荷模型,通过仿真获取机组的最大进相深度及其对应电压,如表 4 所示(表中机组出力为标么值)。当机组带 75% 和 100% 负荷时,夏季和冬季的机组最大进相深度相同,分别为 -40 Mvar 和 -200 Mvar,进相深度受限因素均为静态稳定极限。夏季负荷比冬季负荷大,高厂变压降较大,导致夏季 10 kV 母线和 6 kV 母线电压较低,夏季的最大进相深度更易受到厂用电电压的限制。当机组带 50% 负荷时,夏季和冬季的 6 kV 和 10 kV 厂用电母线电压均达到了额定值的 95%(5.7 kV 和 9.5 kV),夏季最大进相深度 -268 Mvar 比冬季最大进相深度 -290 Mvar 浅。因此,可得出如下 2 点结论:(1)进相深度相同时,厂用电负荷越大,厂用电电压越低;(2)不考虑静态稳定极限时,厂用电负荷越大,机组最大进相深度越浅。

表 4 不同季节进相试验仿真结果对比
Table 4 Comparison of simulative results of leading-phase test among different seasons

季节	机组出力	最大进相深度/Mvar	6 kV 母线电压/kV	10 kV 母线电压/kV
夏季	0.50	-268	5.70	9.50
	0.75	-200	5.75	9.59
	1.00	-40	5.81	9.68
冬季	0.50	-290	5.70	9.50
	0.75	-200	5.78	9.63
	1.00	-40	5.83	9.71

4.3 机组有功出力对进相深度的影响

机组有功出力不同时,进相深度受限的因素有所不同,如图 8 所示。系统电压为 515 kV 时,机组出力 1000 MW 对应的进相深度受到静态稳定极限的约束,最大为 40 Mvar;机组出力 500 MW 对应的进相深度受到厂用电电压的约束,最大为 290 Mvar。

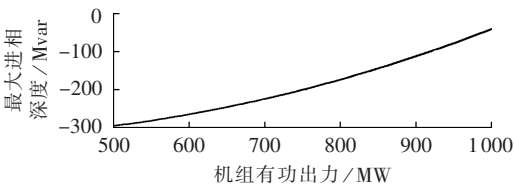


图 8 最大进相深度与机组出力的关系

Fig.8 Relationship between maximum leading-phase depth and active power output of units

4.4 系统电压对进相深度的影响

机组出力相同、系统电压不同时,进相深度受限的因素也存在差别,如图 9 所示。系统电压较高时,机组出力 750 MW 对应的进相深度受静态稳定极限的约束,为 200 Mvar;厂用电电压随系统电压降低而降低,当系统电压下降到 515.6 kV 时,机组进相深度的受限条件由静态稳定极限变为厂用电电压。

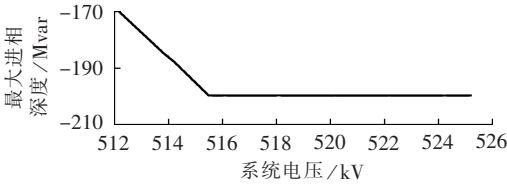


图 9 最大进相深度与系统电压的关系

Fig.9 Relationship between maximum leading-phase depth and system voltage

4.5 机组最大进相深度

综合考虑机组有功出力、系统电压、静态稳定极限和厂用电电压,以夏季机组进相能力为例,机组出力为 $0.5P_{GN} \sim P_{GN}$ 、系统电压为 $1.02U_N \sim 1.05U_N$ 对应的机组最大进相深度如表 5 所示。表 6 为该机组进相测试的结果。机组有功出力较大时以及有功出力较小且系统电压较高时,进相深度主要受限于机组静态稳定极限,仿真结果与实际工程测试结果相同;机组出力较小且系统电压较低时,进相深度受限因素已变为厂用电电压。本文所提仿真方法表明机组进相测试结果偏乐观,未考虑到系统电压水平较低时可能存在厂用电电压过低的问题。

表 5 不同机组出力和不同母线电压下的最大进相深度
Table 5 Maximum leading-phase depths for different unit power outputs and different bus voltages

机组出力/MW	最大进相深度/Mvar						
	526	524	522	520	518	515	514
1000	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
800	-168	-168	-168	-168	-168	-168	-168
750	-200	-200	-200	-200	-200	-200	-185
600	-266	-266	-259	-243	-230	-207	-194
500	-320	-308	-296	-280	-265	-236	-220

注:表中数据表示母线电压,单位 kV。

表 6 进相试验结果
Table 6 Results of leading-phase test

有功功率/MW	进相深度/Mvar	有功功率/MW	进相深度/Mvar
1000	-40	600	-266
800	-168	500	-310
750	-200		

5 结论

本文基于电厂实际运行数据,挖掘厂用电负荷与机组出力之间的关系,在 PSD-BPA 仿真平台中建立较为准确的厂用电负荷修正模型,并综合考虑静

态稳定极限和厂用电电压的影响,测试火电机组的进相能力。算例结果表明本文所提仿真方法可以测试出不同的系统电压水平、机组运行工况和厂用电负荷工况下火电机组的进相能力,能够弥补进相运行试验的不足,为机组运行提供最大进相深度的参考值。

参考文献:

- [1] 王成亮,王宏华. 同步发电机进相研究综述[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):131-135.
WANG Chengliang,WANG Honghua. Review of synchronous generator leading-phase operation[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):131-135.
- [2] 韦延方,卫志农,张友强,等. 发电机进相运行的研究现状及展望[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(9):146-154.
WEI Yanfang,WEI Zhinong,ZHANG Youqiang,et al. Progress and development trend on leading phase of generator[J]. Power System Protection and Control,2012,40(9):146-154.
- [3] 蒲倩,张毅威,陈磊,等. 容性孤网发电机进相运行与紧急电压控制[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(18):24-29.
PU Qian,ZHANG Yiwei,CHEN Lei,et al. Generator's leading phase operation and emergency voltage control of capacitive isolated network[J]. Power System Protection and Control,2012,40(18):24-29.
- [4] 杨银国,李扬絮,李力,等. 广东电网春节期间无功电压调控存在的问题与对策[J]. 电网技术,2007,31(增刊2):135-138.
YANG Yinguo,LI Yangxu,LI Li,et al. Analysis and countermeasures for volt/var control in Guangdong Power Grid during the period of Spring Festival[J]. Power System Technology,2007,31(Supplement 2):135-138.
- [5] 徐波,单周平. 湖南电网并网发电机进相运行现状与分析[J]. 湖南电力,2011,31(增刊1):50-53.
XU Bo,SHAN Zhouping. Leading phase operation present situation and analysis of Hunan Power Grid's generators[J]. Hunan Electric Power,2011,31(Supplement 1):50-53.
- [6] 牟童,宋丹,叶峰. 计及静稳极限的发电机进相运行能力研究[J]. 东北电力技术,2010(10):7-10.
MOU Tong,SONG Dan,YE Feng. Capability study on generator leading operation considering static stability limit[J]. Northeast Electric Power Technology,2010(10):7-10.
- [7] 刘华林. 发电机进相试验分析与探讨[J]. 广西电力,2015,38(2):43-45.
LIU Hualin. Analysis and discussion on generator leading-phase test[J]. Guangxi Electric Power,2015,38(2):43-45.
- [8] 翟学锋,卫志农,范立新,等. 基于相关向量机的发电机进相能力建模[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):146-151.
ZHAI Xuefeng,WEI Zhinong,FAN Lixin,et al. Generator leading phase capability model based on relevance vector machine[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):146-151.
- [9] 李志强,何风军,晁晖,等. 进相试验中凸极同步发电机静态稳定限制的数值分析[J]. 电机与控制学报,2011,15(12):89-95.
LI Zhiqiang,HE Fengjun,CHAO Hui,et al. Numerical analysis of steady state stability limit of salient synchronous generator in leading power factor operation test[J]. Electric Machines and Control,2011,15(12):89-95.
- [10] 史家燕,史源素,赵肖敏,等. 发电机工况参数模型及进相运行在线监测[J]. 中国电机工程学报,2006,26(11):139-143.
SHI Jiayan,SHI Yuansu,ZHAO Xiaomin,et al. The new method of determining the capability of leading phase of generator and realizing the online monitoring[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(11):139-143.
- [11] 曹侃,王涛,忻俊慧. 同步发电机进相能力的快速估算方法[J]. 中国电力,2014,47(1):108-111.
CAO Kan,WANG Tao,XIN Junhui. A fast estimation method of synchronous generator leading phase ability[J]. Electric Power,2014,47(1):108-111.
- [12] 王成亮,王宏华,向昌明,等. 发电机进相能力的RBF神经网络模型[J]. 电工技术学报,2012,27(1):124-129.
WANG Chengliang,WANG Honghua,XIANG Changming,et al. Generator leading phase ability model based on RBF neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(1):124-129.
- [13] 王成亮,王宏华,徐钢. 基于反向传播神经网络的发电机进相能力建模研究[J]. 电网技术,2011,35(11):136-140.
WANG Chengliang,WANG Honghua,XU Gang. Modeling of generator leading phase ability based on back propagation neural network[J]. Power System Technology,2011,35(11):136-140.
- [14] 张锋. 米东热电厂发电机进相运行试验分析[J]. 应用能源技术,2014(1):39-40.
ZHANG Feng. Test and analysis of thermal power plant generator leading phase operation[J]. Applied Energy Technology,2014(1):39-40.
- [15] PRICE W,WIRGAU K,MURDOCH A,et al. Load modeling for power flow and transient stability computer studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1988,3(1):180-187.
- [16] 秦军波. 基于Modelica/Dymola的锅炉辅机系统建模与仿真[D]. 北京:华北电力大学,2010.
QIN Junbo. Modeling and simulation of utility boiler auxiliaries based on the Modelica/Dymola[D]. Beijing:North China Electric Power University,2010.
- [17] 国家电网公司电力调度中心,中国电力科学研究院,华北电力科学研究院,等. 同步发电机进相试验导则:Q/GDW 746—2012[S]. 北京:中国电力出版社,2012.

作者简介:



汤 奕

汤 奕(1977—),男,江苏常州人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail:tangyi@seu.edu.cn);

戴玉臣(1991—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析(E-mail:daiyuchen001@126.com);

陈 斌(1991—),男,江苏常州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析(E-mail:chenbinseu@163.com)。

(下转第108页 continued on page 108)

Coordinated control strategy for interconnected transmission system of VSC-HVDC and LCC-HVDC

WANG Xi¹, LI Xingyuan², WEI Wei¹, DING Lijie¹

(1. Electric Power Research Institute of Sichuan Power Company of State Grid Corporation of China, Chengdu 610000, China; 2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: An interconnected power transmission system of VSC-HVDC (Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current) and LCC-HVDC (Line Commutated Converter based High Voltage Direct Current) is studied and a coordinated control strategy is proposed for the power supplementary controllers of LCC-HVDC and VSC-HVDC to deal with the possible power imbalance at the sending end of LCC-HVDC. Two kinds of DC active power supplementary controller are designed to enhance the balance capacity of areal active power and a reactive power supplementary controller is designed for VSC-HVDC to deal with the voltage fluctuation due to the reactive power imbalance of LCC-HVDC converter station during active power regulation. The simulative results show that the designed power supplementary controllers coordinate with each other to effectively enhance the power balance ability of whole system, verifying the validity of the proposed control strategy.

Key words: LCC-HVDC; VSC-HVDC; power balance; supplementary controller; DC power transmission

(上接第 68 页 continued from page 68)

Unit leading-phase capability simulation based on modified auxiliary power model for thermal power plant

TANG Yi¹, DAI Yuchen¹, CHEN Bin¹, WANG Chenggen²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Aiming at the large error and simple test condition of traditional method for determining the unit leading-phase capability, a method for simulating the unit leading-phase capability of thermal power plant is proposed based on the static auxiliary power model. A modified static auxiliary power model is put forward, which applies the method of parameter identification based on the actual operating data of power plant. The auxiliary power model is built on PSD-BPA software platform to simulate the unit leading-phase depth in different operational conditions when the voltage limit of auxiliary power or the static stability limit of unit is reached. The measured data of a 1000 MW unit from June 2013 to June 2015 are applied to calculate its leading-phase capability. The simulative results are compared with the measured data of its leading-phase test, verifying the effectiveness and rationality of the proposed method.

Key words: thermal power plant; leading-phase capability; auxiliary power; static load model; simulative test