

大型核电站接入系统运行方案研究

熊莉¹, 刘涤尘¹, 赵洁¹, 杜治², 雷庆生², 吴萍¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 湖北省电力试验研究院, 湖北 武汉 430077)

摘要: 针对大畈核电接入湖北电网的输电方案进行了研究和分析, 根据2015年湖北电网的实际情况, 提出了四种接入方案。在电力系统分析综合程序(PSASP)中, 针对两种可行的方案, 将大畈核电站接入电网后的短路电流, 潮流, 网损, 静态安全和暂态稳定性以及接入系统方案的经济性, 进行了计算和仿真。得到的结果验证了两种接入方案的可行性和正确性, 得出了方案2(即分别以两回500 kV线路接入凤凰山变电站和梁公铺变电站)为最经济可行的大型核电站接入系统的方案。

关键词: 核电厂; 接入系统; 电网; 仿真

Study on program of connecting nuclear power plant to power grids

XIONG Li¹, LIU Di-chen¹, ZHAO Jie¹, DU Zhi², LEI Qing-sheng², WU Ping¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Electric Power Research Institute of Hubei Province, Wuhan 430077, China)

Abstract: The system transmission program of connecting Dafan nuclear power plant to power grids in Hubei province is analyzed and discussed. According to actual power grids of Hubei in 2015, four connection schemes are proposed. After connecting nuclear power plant to power grids, short circuit current, tidal current, network loss, the static safety and transient stability are analyzed and simulated aiming at two feasible schemes in PSASP. At the same time, economical efficiency of two connection programs are calculated. Feasibility and validity of the two programs are prove based on obtained results, and program 2 is considered to be the optimal connection system program, which connects two lines for 500 kV grade to Fenghuangshan and Liangongpu transformer substation respectively.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China Connects (No. 51077103).

Key words: nuclear power plant; connected to the system; power grids; simulation

中图分类号: TM715 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2011)06-0050-05

0 引言

湖北省是一次能源较为缺乏的省份, 用煤主要靠省外供应, 这为电力生产和供应带来了一定的影响。随着远景湖北省的水电资源开发完毕, 电煤运输压力增加, 同时可再生能源的发电规模很小, 不能满足电力生产的需要。因此为了确保湖北省未来电力的可靠供应, 优化能源结构和合理调整电源结构, 湖北省的电力工业应该发展核电, 与其它常规能源相比, 核电具有清洁、安全、经济、可靠的特点。在湖北建立大型核电电源, 对优化电源布局, 提高电网安全稳定性具有重要的意义。

本文以大畈核电机组和湖北电网为实例, 分别

从短路电流, 潮流, 网损, 静态安全分析和暂态稳定性的影响以及经济性角度, 对大畈核电接入湖北电网的几种方式进行了比较和分析, 得到了大畈核电接入湖北电网最优的输电接入方案。

1 大畈核电厂接入系统方案的设计

1.1 大畈核电厂接入系统的电压等级及送电范围

湖北大畈核电站拟采用 AP1000 核电机组, AP1000 核电厂为美国西屋公司采用非能动的设计理念开发的第三代大型压水堆核电厂^[1]。2015年计划投产2台1250 MW机组, 本文的计算水平年均取2015年。根据文献[2], 单机容量为500 MW及以上机组, 一般宜直接接入500 kV电压电网。因此为了保证核电电力能够安全可靠送出, 大畈核电站考虑采用500 kV电压接入系统。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51077103)

文献[3]指出核电厂的送出线路中任一回检修停运,另一回又突然故障,应该维持机组安全运行的出力输电;核电厂送出线仅向一个受端系统送电时,受端不得仅接于一座变电所。因此考虑大畈核电出线4回,分接于2个变电所。

考虑鄂西地区送入的电力及新增的火电电源后,鄂东地区“十二五”末期电力基本平衡,电力缺额主要表现在武汉江南及黄石地区。加上鄂东地区又有白莲荷抽水蓄能电站可以为其调峰,因此湖北大畈核电站的电力主要在本地消纳。主要供电区域为鄂东江南地区,主供方向为武汉江南及黄石地区,远期可以兼顾供电咸宁地区。

1.2 核电厂接入系统方案的分析

2015年大畈核电站址附近可供接入的500kV变电站主要有咸宁、磁湖、阳新、江夏、武东、凤凰山和鄂州7座500kV变电站。由于磁湖变仅计划6个500kV出线间隔,且距城区较近,无法扩建;而2015年光谷变和钢都变消纳不了核电电力,还将送往凤凰山变消纳,存在一定的电力倒送,因此也不建议大畈核电接入光谷变。考虑核电投产前新建梁公铺开关站,为核电接入创造条件。大畈核电投产初期主要考虑在黄石电网及武汉江南电网消纳。结合核电站所处位置及消纳方向分析,对大畈核电接入后其近区网架进行优化有以下4种方案,如图1所示。

方案1:为配合大畈核电接入,2015年新建梁公铺开关站,单 π 接入磁湖-永修1回线,并新增梁公铺-磁湖第2回线,大畈核电出线4回,2回线接入梁公铺开关站,单回线路长度约70km,2回线接入咸宁变,单回线路长度约40km。

方案2:梁公铺的接入与方案1相同,大畈核电出线4回,2回线接入梁公铺开关站,单回线路长度约70km,2回线接入凤凰山变,单回线路长度约80km。

方案3:梁公铺的接入与方案1相同,大畈核电出线4回,2回线接入梁公铺开关站,单回线路长度约70km,2回线接入江夏变,单回线路长度约80km。

方案4:将凤凰山~咸宁线路由凤凰山改接入江夏站,改接线路长度约 2×16 km。凤凰山作为终端变运行,仅以2回线接入江夏变。梁公铺的接入与方案1相同,大畈核电出线4回,2回线接入梁公铺开关站,单回线路长度约70km,2回线接入江夏变,单回线路长度约80km。

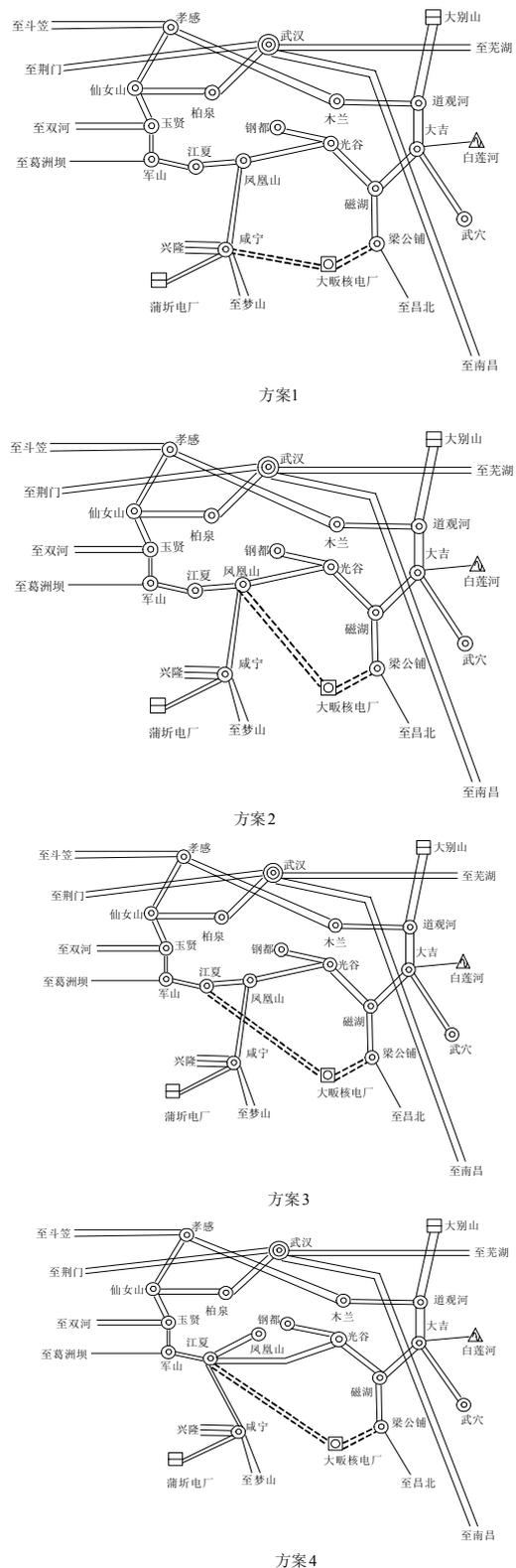


图1 大畈核电接入系统的线路图

Fig.1 Circuit diagram of Dafan nuclear power plant connection system

考虑到蒲圻电厂二期将以2回500 kV线路接入咸宁变，线路长度约60 km，大畈核电不宜再接入咸宁变电站。根据上面的分析，大畈核电站接入湖北电网可行的方式推荐为方案2和方案3。

2 大畈核电厂接入系统两种方案的比较

利用电力系统分析综合程序(PSASP)^[4-5]计算和分析在核电接入点不同(江夏、凤凰山变)的方案下，系统的短路电流，潮流，网损以及对电网稳定性的影响，比较方案2和3接入方式的技术性和经济性。同时对大畈核电站在这两种方案下接入系统的可行性和正确性进行校核。

2.1 不同接入方案下短路电流的分析

由于2015年大畈核电及蒲圻二期等电源的投产，鄂东环网结构进一步加强，短路电流问题将成为限制电网发展的主要问题。因此对上述两个核电接入系统方案的鄂东环网相关站点短路电流进行校核。在短路电流合理的水平下再进行潮流及稳定的校核。其短路电流的计算结果如表1和表2所示。

表1 短路电流计算结果表(加串抗前)

Tab.1 Calculation of short circuit current (without reactance)

	方案2	方案3
江夏	60.3	61.9
凤凰山	65.6	63.2
咸宁	49.8	50.2
光谷	58.9	57.1
磁湖	49.6	49.3
玉贤	53.9	55.5
军山	57.2	58.0
大畈核电	45.6	45.1
梁公铺	45.8	45.6

表2 短路电流计算结果表(军山-江夏线路加装串抗后)

Tab.2 Calculation of short circuit current (adding reactance to Junshan-Jiangxia line)

	方案2	方案3
江夏	53.3	54.0
凤凰山	59.4	58.1
咸宁	48.5	49.0
光谷	55.2	54.4
磁湖	49.6	46.5
玉贤	53.9	49.5
军山	57.2	47.5
大畈核电	45.6	42.5
梁公铺	45.8	42.9

从表1可以看出：鄂东地区，由于大型电源及核电的投产，短路电流上升较快，绝大部分变电站的短路电流超过或几乎接近50 kA，其中江夏、凤凰山的短路电流均超过了60 kA，凤凰山的短路电流更是超过了断路器的开断能力。所以对两种接入方案都需要采取措施，为了解决变电站的短路电流超标问题，考虑在军山-江夏线路加装15 Ω的串抗。考虑了限流措施后，鄂东江南各站点的短路电流均可限制在60 kA以下，见表2所示，对于降低江夏和凤凰山地区的短路电流效果较为明显。

2.2 不同接入方案下潮流和网损的分析

2015年，湖北电网的潮流流向仍是西电东送、北电南送的格局，其西部电力外送通道、中部主框架电网上潮流分布合理，鄂东受端环网潮流分布较为均匀，单回线路潮流在4~110万kW之间。其中玉贤-军山、军山-江夏线路潮流较重，单回线潮流在110万千瓦左右。方案2中，大畈核电输出电力分配不均匀，至凤凰山单回线潮流约为83 MW，至梁公铺单回线潮流约为968 MW，即约92%的电力由梁公铺送出。大畈核电电力大部分输入黄石电网，基本上可由黄石及武汉江南电网消纳。方案2形成的大畈-梁公铺-磁湖-光谷-凤凰山-大畈的环网结构，与方案3比较，环网覆盖范围略小，未能将江夏变串入环网。方案3中，大畈核电送出电力分配较方案2更不均匀，其中94%电力由梁公铺送出。方案2网损为24.066 MW，较方案3网损24.296 MW略小。

2.3 不同接入方案下的静态安全分析

选取丰大正常运行方式，对2015年湖北500千伏及以上网络进行了“N-1”故障方式潮流校核计算^[6-7]。由方案3计算结果可知：2015年三峡右一-葛换线路和玉贤-军山线路N-1潮流分别高达234万kW和181万kW，均超过线路热稳定极限。此外军山-江夏线路潮流也较重，N-1潮流约171万kW，接近线路热稳定极限。湖北电网其它500 kV线路潮流分布均匀，没有重载及过载现象，可以满足电网运行要求。方案2的情况与方案3基本相似。

2.4 不同接入方案下电网和大畈机组稳定性分析

在湖北电网2015年丰大运行方式下，假设 $t=5.0$ s时，在大畈~梁公铺线路上发生三相短路故障，且故障短时无法清除，保护正确动作，大畈侧0.09 s、凤凰山侧0.1 s切除线路，得到方案2和方案3的电网暂态曲线分别如图2和图3所示。

由图2和图3可知，方案2和3在大畈500-梁公铺500线路发生短路后跳开情况下，大畈核电机组响应基本相同。

同时对 2015 年湖北电网 500 kV 及以上交流线路丰大方式单一故障稳定计算^[8-9]。稳定计算结果表明:湖北电网 1 000 kV 线路及任一回 500 kV 线路发生三相永久性短路故障或单瞬故障时,系统均能保持稳定,两种方案均能满足电力系统安全稳定导则的要求。

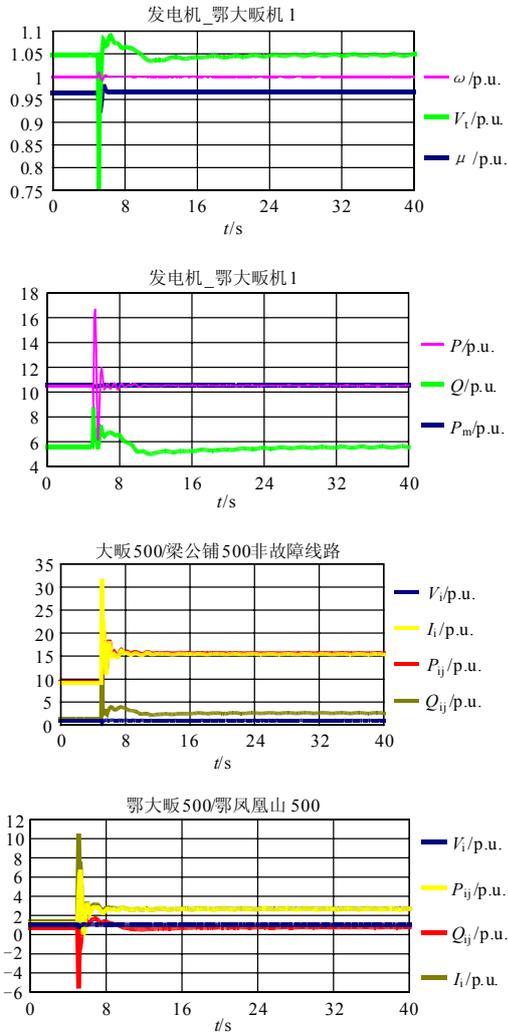


图 2 方案 2 大畈~梁公铺线路发生短路后跳开情况下,大畈机组及其出线暂态曲线

Fig.2 Transient curve of Dafan nuclear power units after lines short circuit according to scheme 2

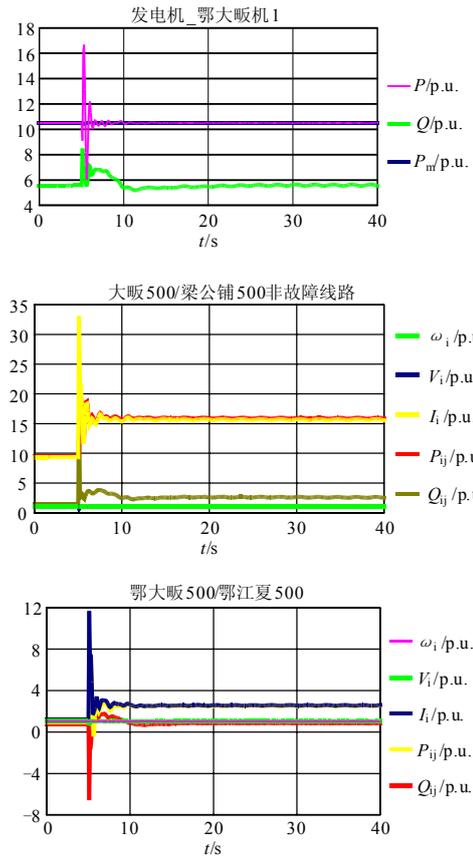
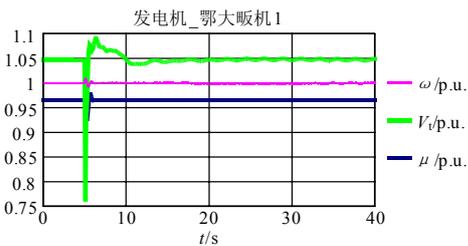


图 3 方案 3 大畈~梁公铺线路发生短路后跳开情况下,大畈机组及其出线暂态曲线

Fig.3 Transient curve of dafan nuclear power units after lines short circuit according to scheme 3

2.5 两种接入方案的经济性比较

采用年费用比较法^[10],年费用比较法是将参加比较的诸方案计算期的全部支出费用折算成等额年

表 3 接入系统方案的经济性比较

Tab.3 Comparison of system program economical efficiency

	方案 2		方案 3	
	核电厂— 梁公铺	核电厂— 凤凰山	核电厂— 梁公铺	核电厂— 江夏
主要规范	LGI-4× 500		LGI-4×500	LGI-4×500
数量	2	2	2	2
初期投资估算	50 400		50 312	
初期投资的年费用	5 131		5 122.1	
年运行维护费	756		754.7	
网损相对值	0		49.34	
总年费用	5 887		5 926.14	
年费用差值	0		39.14	

万元

费用后进行比较^[11-12]，年费用低的方案为经济上优越方案。用 C_1 表示年总费用， $C_1 = AC + C' + C''$ ； AC 为初期投资的年费用， $AC = I_0 \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$ ；其中 I_0 为初期投资费； i 为电力工业的投资回报率，取 0.09； n 为使用年限（经济寿命），取 25 年； C' 为年运行维护费， $C' = AC \times 1.5\%$ ； C'' 为电量损耗年费用， $C'' = P_i \times \tau \times P_e$ ； P_i 为线路的损耗； τ 为损耗小时数，考虑到核电站年负荷利用小时数 T_{max} 一般较高，约 7000 h 左右，当核机组的功率因素取 0.9 时，相应的损耗小时数 τ 取 5000 小时； P_e 为上网电价，参照大亚湾核电站的电价 0.429 元/kWh。

从表 3 中可以看出，方案 2 的总年费用比方案 3 要低 39.1 万元。因此采用方案 2 比方案 3 更经济些。

3 结论

本文根据湖北电网的实际情况，研究了大畈核电站接入系统的方式，并在 PSASP 中仿真计算了不同接入方式下的技术可行性和经济性。仿真和计算的结果表明：

- 1) 从潮流上看，方案 2 大畈核电送出电力与方案 3 相比，不均匀程度相对较低；
- 2) 从网损来看，方案 2 网损比方案 3 要小一些；
- 3) 从短路电流计算结果来看，在军山-江夏线路加装 15 Ω 的串抗后，两种方案短路电流均可限制在 60 kA 以下；
- 4) 从潮流“N-1”情况来看，两种方案下鄂东南部环网潮流均不是很重，大畈核电外送线路以及鄂东南部环网相关线路发生“N-1”故障时，均能保证大畈核电电力的可靠送出；
- 5) 从暂态稳定计算结果来看，两种接入方案对大畈核电机组影响相似，两种方案均能满足电力系统安全稳定导则的要求；
- 6) 从经济性来看，选择方案 2 比方案 3 费用要小一些。

综上所述，选择方案 2 和方案 3 都是可行的、正确的接入方式，两者相差不是太大。但是从技术上和经济上都应该优先考虑方案 2，即大畈核电站以 500 kV 电压接入系统，本期出线 4 回，分别为：至梁公铺变 2 回（提前新建梁公铺开变电站，单 π 接入磁湖-永修 1 回线，并新增梁公铺~磁湖第 2 回线），单回线路长度约 70 km，导线截面考虑采用 4×500 mm²；至凤凰山变 2 回，单回线路长度约 80 km。导线截面考虑采用 4×500 mm²。

参考文献

- [1] 沈瑾, 江光明, 唐钢, 等. 先进堆非能动余热排出系统应对全断电事故的能力分析[J]. 核动力工程, 2007, 28 (2): 87-90.
SHEN Jin, JING Guang-ming, TANG Gang, et al. Application of passive residual heat removal system under blackout accident of Chinese advanced nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28 (2): 87-90.
- [2] 《电力系统技术导则》(SD 131-84, 试行) [S]. 中华人民共和国水利电力部.
Technical Guidelines for Power System(SD 131-84, Planning and Operation)[S]. Ministry of Water Conservancy and Electric Power.
- [3] 《电力系统设计技术规程》(SDJ 161-85, 试行) [S]. 中华人民共和国水利电力部.
Technical Code of Design for the Electric Power System (SDJ 161-85, Planning and Operation) [S]. Ministry of Water Conservancy and Electric Power.
- [4] 电力系统分析综合程序 (PSASP) 用户手册[M]. 中国电力科学研究院, 2001.
User's manual of power system analysis software package[M]. China Electric Power Research Institute, 2001.
- [5] 田华, 王卿, 朱峰, 等. 基于 PSASP 程序的短路电流计算结果分析比较探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (1): 56-60.
TIAN Hua, WANG Qing, ZHU Feng, et al. Comparative study of short-circuit current calculation results based on PSASP software[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (1): 56-60.
- [6] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
WANG Xi-fan. Modern power system analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [7] 赵遵廉, 舒印彪, 郭国川. 《电力系统安全稳定导则》学习与辅导[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
ZHAO Zun-lian, SHU Yin-biao, GUO Guo-chuan. Learning and tutorship of guide on security and stability for power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [8] HU Xue-hao, ZHENG Xue-cheng, et al. Pressurized water reactor nuclear power plant (NPP) modeling and the midterm dynamic simulation after NPP has been introduced into power system[C]. //IEEE TENCON'93, Beijing, China: 1993: 367-370.
- [9] 袁季修. 电力系统安全稳定控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
YUAN Ji-xiu. Security and stability control of power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.

(下转第 60 页 continued on page 60)

[6] 揭海宝, 郭清滔, 康积涛, 等. 基于模糊自调整PID控制的同步发电机励磁研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 89-92.
JIE Hai-bao, GUO Qing-tao, KANG Ji-tao, et al. Simulation of synchronous excitation controller based on fuzzy self-regulation PID control[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 89-92.

[7] 石雪梅, 汪志宏, 桂国亮, 等. 发电机励磁系统数学模型及参数对电网动态稳定性分析结果影响的研究[J]. 继电器, 2007, 35(21): 22-27.
SHI Xue-mei, WANG Zhi-hong, GUI Guo-liang, et al. Research on the influence of generators based on detailed excitation system models and parameters to power grid dynamic stability[J]. Relay, 2007, 35(21): 22-27.

[8] 陈铁, 舒乃秋. 非线性励磁控制方法的研究[J]. 继电器, 2005, 33(19): 28-30,35.
CHEN Tie, SHU Nai-qiu. Research of the nonlinear excitation based on the direct feedback linearization[J]. Relay, 2005, 33(19): 28-30,35.

[9] IEEE Task Force on Excitation Limiters. Under excitation limiter models for power system stability studies[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1995, 10 (3) : 524-531.

[10] BERUBE G R, HAJAGOS L M, BEAULIEU R E. A utility perspective on under-excitation limiters[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1995, 10 (3) : 532-537.

[11] CHOI S S, JIA X M. Under excitation limiter and its role in preventing excessive synchronous generator stator end-core heating[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (1) : 95-101.

[12] CHOI S S, LARKIN R, BASTICK M T, et al. Effects of underexcitation limiters on operation of remote generating station[J]. IEE PROCEEDINGS-C, 1991, 138 (6) : 560-566.

[13] MOZINA C J, REICHARD M, BUKHALA Z, et al. Coordination of generator protection with generator excitation control and generator capability[C]. //2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, IEEE PES, Tampa, United States, 2007.

[14] 宋福海. 水口水电厂7号机组励磁系统异常分析[J]. 水电自动化与大坝监测, 2004, 28 (6) : 8-11.
SONG Fu-hai. Analysis on excitation system abnormality of unit 7 in the Shuikou hydropower station. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2004, 28 (6) : 8-11.

[15] 中国电力科学研究院. 《电力系统安全稳定导则》修编电网协调研究报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.

[16] DL/T650-1998 大型汽轮发电机自并励静止励磁系统技术条件[S].

[17] DL/T843-2003 大型汽轮发电机交流励磁机励磁系统技术条件[S].

[18] DL 755-2001 电力系统安全稳定导则[S].

[19] DL/T684-1999 珠笔大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S].

收稿日期: 2010-04-09; 修回日期: 2010-05-30

作者简介:

王青(1974-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析和控制; E-mail: wangqing@epri.sgcc.com.cn

刘肇旭(1941-), 男, 教授级高级工程师, CSEE和IEEE高级会员, 研究方向为电力系统安全稳定分析和控制;

孙华东(1975-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析和控制。

(上接第54页 continued from page 54)

[10] 范文涛, 程林, 孙元章. 电网改造简化经济分析方法研究[J]. 继电器, 2004, 32 (19): 80-84.
FAN Wen-tao, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang. Research on simplified economic evaluation for power grid renovation[J]. Relay, 2004, 32 (19): 80-84.

[11] 万国成, 任震, 黄金凤. 配电网投资决策[J]. 继电器, 2002, 30 (10): 6-9.
WAN Guo-cheng, REN Zhen, HUANG Jin-feng. Study on decision-making of investment of distribution sub-system [J]. Relay, 2002, 30 (10): 6-9.

[12] 彭士禄. 2×600MW 压水堆核电厂上网电价计算与分析[J]. 核动力工程, 1993, 14 (2): 97-106.

PENG Shi-lu. Calculation and analysis of electric price in connection-grid of 2×600MW PWR nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering, 1993, 14 (2): 97-106.

收稿日期: 2010-04-06; 修回日期: 2010-06-23

作者简介:

熊莉(1984-), 女, 博士研究生, 从事核电站建模、电力系统仿真计算、电力系统稳定控制等研究; E-mail: xiongli1102@163.com

刘涤尘(1953-), 男, 教授, 从事电力自动监控技术、电力系统稳定与控制、电力电子技术应用等研究。