

三峡电站电气主接线可靠性分析

冯怡¹, 周家启¹, 赵霞¹, 姚登峰²

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 三峡水力发电厂, 湖北 宜昌 443003)

摘要: 运用统一 $n+2$ 状态马尔可夫模型, 选择三峡机组投产至 2006 年 (三峡工程二期结束及三期初期) 这一典型阶段为主要研究内容, 对三峡左岸电站在不同运行方式和负荷水平下进行供电连续性、充裕性的计算分析, 并对各个元件可靠性参数进行敏感度分析, 分析发现: 改变发电机和断路器的故障率对整个电站的可靠性有显著影响, 由此提出改善当前电站机组及系统可靠性的指导性建议。

关键词: 三峡电站; 电站主接线; 统一 $n+2$ 状态马尔可夫模型; 可靠性综合分析; 敏感度分析

Reliability evaluation of the Three Gorges power station configuration

FENG Yi¹, ZHOU Jia-qi¹, ZHAO Xia¹, YAO Deng-feng²

(1. The State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030; 2. Three Gorges Hydropower Plant, Yichang 443003, China)

Abstract: Based on the generalized $n+2$ state Markov model, this paper chooses the period between the beginning that the generators are brought into service and 2006 (the end of the second-phase of the Three Gorges Project) as the research content, and presents the continuity, adequacy and security calculation of the Three Gorges left bank power station. Also the reliability indices of different operating philosophies and load standards are compared and analyzed. The sensitivity indices of reliability of the Three Gorges power station with respect to equipment parameters and the reason why the reliability indices is low are analyzed, the results show that the influence on changing the failure rate of generators and breakers is obvious, and suggestions to improve the reliability are finally proposed.

Key words: the three gorges power station; power station configuration; generalized $n+2$ state Markov model; reliability analysis; sensitivity analysis

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)03-0021-06

0 引言

随着三峡左岸电站机组的陆续投产发电, 以三峡电站为中心的三峡电力系统逐渐形成和扩大, 为确保三峡电力系统的安全稳定运行, 充分发挥三峡工程效益, 三峡电站安全稳定运行显得至关重要^[1~3]。

采用可靠性评估模型对三峡电站主接线进行可靠性计算, 制定定量评价指标或准则, 在协调经济性与可靠性的基础上, 对其进行综合评价, 并提出改进和提高可靠性水平的具体措施, 安排合理的运行方式和检修方式, 以减小停机、停电的频率和时间, 减小停电损失, 对提高三峡机组运行稳定性及三峡电力系统的可靠性具有明显的经济效益和社会效应。

本文选择三峡机组投产至2006年 (三峡工程二

期结束及三期初期)^[3]为主要研究内容, 对2003~2006年三峡电站及其送出系统的可靠性进行研究。在此基础上提出改善当前电站机组及系统可靠性的指导性建议, 并为三期工程建成后三峡系统的运行决策提供定量的可靠性分析依据。

1 电站主接线可靠性指标体系

一般说来, 可靠性指标的定义应考虑以下因素: (1) 所定义的指标要能全面地反应系统的运行、控制特征; (2) 便于不同方案或不同系统之间的比较; (3) 易于被工程人员所接受, 对工程决策应有指导意义。因此, 本文在国内外对电站主接线可靠性指标研究^[4,5]的基础上, 参照了发输电组合系统^[6,14]、高压配电系统及中压配电系统可靠性指标体系^[7,8], 选用如下几组电站主接线可靠性指标:

评价连续性的一组指标: 电站出力受阻概率

LOLP (loss of load probability); 电站出力受阻时间期望LOLE(loss of load expectation); 电站出力受阻频率FLOL(frequency of loss of load); 电站出力受阻平均持续时间D (duration of loss of load)。

评价充裕性的指标: 电站少供(或受阻)电力期望EDNS(expected demand not supplied); 电站少供(或受阻)电量期望EENS(expected energy not supplied)。一台至多台机组被解列的概率和频率; 一条至多条出线失去电源的概率和频率。

参数敏感度指标: 电站出力受阻时间期望对元件故障概率的敏感度 $\partial LOLE/\partial q_i$; 电站少供电量期望对元件故障概率的敏感度 $\partial EENS/\partial q_i$; 电站少供电量期望对元件容量的敏感度 $\partial EENS/\partial c_i$ 。其中 q_i 为元件 i 的故障概率, c_i 为元件 i 允许通过的容量。

2 电站主接线可靠性评估模型

文献[9]提出了 $n+2$ 状态马尔可夫模型, 较全面的计及元件的切换序列、备用影响、符合曲线、运行方式和调峰影响, 文献[10]提出了统一的 $n+2$ 状态马尔可夫模型, 在安顺500 kV变电站, 向家坝500 kV变电站等工程项目中得到广泛应用^[11], 并基于此模型开发了电站主接线可靠性综合分析系统^[12], 为电站主接线方案设计提供了更科学、更充分的量化决策依据。

(变) 电站电气主接线可靠性评估的统一 $n+2$ 状态马尔可夫模型^[13]如图1所示, 模型充分考虑了各种故障模式、运行方式、优化切换序列并计及了元件容量等因素。

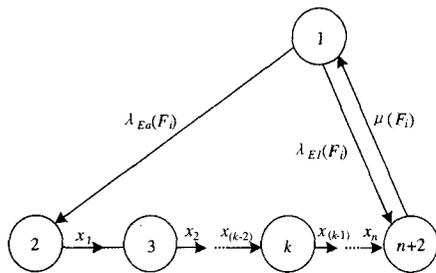


图1 统一 $n+2$ 马尔可夫模型

Fig.1 Generalized $n+2$ state Markov model

其中: λ_{ai} 、 λ_{pi} 、 μ_i 、 t_{si} 、 P_{si} 分别为元件 i 的短路故障率(次/年)、断路故障率(次/年)、修复率(次/年)、操作时间(或投入它所需要的时间)(小时/次)及拒动率。 λ_i^* 、 γ_i^* 分别为元件 i 的计划检修率(次/年)、计划检修时间(小时/次)(当元件 i 存在着备用

时, γ_i^* 为其备用的投入时间或安装时间)。 $\mu_i^* = 8760/\gamma_i^*$ 。设在事故发生后运行人员的决策时间期望为 T_d (小时), 故障隔离时间期望为 T_{is} 。

设 P_j 为子状态 j 发生的概率, 由图1所示的状态空间图可得如下的方程组:

$$\begin{aligned} P_1 \times \lambda_{Ea}(F_i) &= P_2 \times x_1 \\ P_2 \times x_1 &= P_3 \times x_2 \\ &\vdots \\ P_k \times x_{k-1} &= P_{k+1} \times x_k \\ &\vdots \\ P_{n+1} \times x_n + P_1 \times \lambda_{Ep}(F_i) &= P_n + 2 \times \mu_E(F_i) \\ P_1 + P_2 + \dots + P_k + \dots + P_{n+2} &= 1 \end{aligned} \quad (1)$$

设 $LOLP(F_i)$ 、 $EENS(F_i)$ 分别为失效事件 F_i 发生时电站出力受阻的概率和少供电量期望, DNS_j 为 F_i 发生时第 j 个子状态电站出力受阻的大小; 记 $P(F_i)$ 为除 F_i 包含的元件以外的其它所有的元件处于正常状态的概率之积。式(2)、(3)给出了相关的计算公式:

$$LOLP(F_i) = P(F_i) \times \left(\sum_{j=2}^{n+1} P_j + m \times P_{n+2} \right) \quad (2)$$

$$EENS(F_i) = P(F_i) \times \left(\sum_{j=2}^{n+2} P_j \times DNS_j \right) \quad (3)$$

在式(2)中:

$$m = \begin{cases} 1 & \text{当 } DNS_{n+2} \neq 0 \\ 0 & \text{当 } DNS_{n+2} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

设所测试范围的电站主接线失效事件为 F , 则可得电站主接线可靠性指标的计算公式:

$$LOLP = \sum_{F_i \in F} LOLP(F_i) \quad (5)$$

$$LOLE = 8760 \times LOLP \quad (\text{小时/年}) \quad (6)$$

$$EENS = 8760 \times \sum_{F_i \in F} EENS(F_i) \quad (\text{MWh/年}) \quad (7)$$

为了使失效事件对电站出力的影响减小到最小程度, 选择 $EENS(F_i)$ 作为目标函数。这样, 在失效事件 F_i 发生时的最优切换操作序列就是满足下式的序列:

$$\min EENS(F_i) \quad (8)$$

式(8)是离散优化问题。为了使算法具有实用性, 采用了启发式原理去寻求近似最优切换操作序列: 即设在失效事件 F_i 下可切换元件组成的集合为 $S(F_i)$, 从 $S(F_i)$ 中依据某判别标准, 选择第一台较优的切换操作元件 $S1$; 当 $S1$ 切换操作完成后, 又从 $S(F_i)$

中寻找另外一个最优的切换元件; 如此类推, 即可得到最优切换操作序列。

3 三峡电站左岸主接线可靠性计算

左岸电厂电气主接线上分为左一、左二电厂, 均采用1倍半接线, 左一、左二500 kV母线间设有联络开关。左一电站有1-8#机组分别通过联合扩大单元送到500 kV GIS开关站, 左一电站设有一回与万县联络线; 三回送到龙泉换流站。9-14#机组分别通过

联合扩大单元送到500 kV GIS开关站, 左二电站设有三回送到江陵换流站, 在江陵换流站还设有2回500 kV路线与斗笠变电站相连^[3]。

3.1 原始数据

根据长江水利委员会提供的计算参数, 并参照《水电站主接线可靠性计算导则》以及国内外相关数据, 选用表1中的数据作为元件可靠性原始数据。在可靠性评估中, 发电机失效事件考虑至四阶组合, 其它失效事件考虑至二阶组合。

表1 元件可靠性原始参数

Tab.1 Components reliability original parameters

元件	λ_n /(次/年)	λ_v /(次/年)	P_g (%)	γ /(小时/年)	λ'' /(次/年)	γ'' /(小时/次)
机组	3.5000	-	-	73	0.2	2190
主变压器	0.0205	-	-	300	1	160
高压断路器	0.0600	0.02	0.5	160	1	120
发电机断路器	0.1200	0.04	1.0	200	1	140
线路	0.425L	-	-	16	0.5	24

表2 系统在不同负荷水平下供电连续性和充裕度指标

Tab.2 System power supply continuity and adequacy indices under variant load level

序号	LOLP	LOLE/(小时/年)	FLOL/(次/年)	EDNS/MW	EENS/MWh
方案1	5.30E-01	4642.9	74.152	7.238E+04	3.919E+06
方案2	6.91E-03	60.542	6.8705	4.956E+03	4.534E+04
方案3	4.86E-04	4.2599	0.2764	1.822E+02	2.976E+03
方案4	1.53E-10	0	2E-6	2.569E-03	1.875E-03

表3 系统在不同负荷水平下机组解列及出线失电源概率

Tab.3 Probability of units isolated and lines out of service under variant load levels

方案	被解列的机组数	概率	频率/(次/年)	失电源的出线数	概率	频率/(次/年)
方案1	1	5.556E-02	11.34	1 2 3	5.8E-5 7.468E-07 2.183E-10	0.826 1.006E-02 2.7E-6
	2	9.585E-03	8.942			
	3	4.621E-06	0.067			
	4	9.185E-07	0.013			
	5	-	-			
	6	2.183E-10	-			
方案2	1	-	-	1 2 3	2.381E-05 7.458E-07 2.183E-10	0.349 1.054E-02 2.7E-06
	2	2.526E-04	3.686			
	3	1.738E-04	2.537			
	4	9.185E-07	0.013			
	5	-	-			
	6	2.183E-10	-			
方案3	1	-	-	1 2 3	2.637E-07 1.431E-7 2.183E-10	3.858E-03 2.096E-03 2.7E-06
	2	1.235E-07	0.002			
	3	-	-			
	4	9.185E-07	0.013			
	5	-	-			
	6	2.183E-10	-			
方案4	1	-	-	1 2 3	- - 2.183E-10	- - 2.7E-6
	2	-	-			
	3	-	-			
	4	-	-			
	5	-	-			
	6	2.183E-10	-			

3.2 系统在不同负荷水平下的可靠性指标

在不同负荷水平下系统的可靠性显然是不同的, 为了研究系统可靠性随负荷水平变化而变化的趋势, 假设以下四种方案, 方案1是系统在最大运行方式下运行即负荷为9 800 MW, 方案2是负荷为8 400 MW, 方案3是负荷为7 700 MW, 方案4是负荷为7 000 MW, 并设左岸机组均可全额发电即系统的最大可用容量为9 800 MW。各种方案下, 左岸电站的供电连续性和充裕度指标见表2, 安全性指标表3。

从表2和表3可知, 系统可靠性随负荷水平的减小其供电连续性、充裕性都将提高。特别是负荷减小到7 700 MW时, 系统各方面的可靠性指标均达到较高水平, 此时只发生4台或6台机组解列和最多3回线路失电源事件, 且发生的频率较小, 如四台机组解列的频率为0.012 84次/年, 即100年发生1次。

由计算可知系统的可靠性水平的提高与负荷水平的降低有一定关系。当负荷降到7 700 MW即方案3时, 系统的各项可靠性指标都比较理想, 当负荷进一步减小时, 系统的可靠性并未有显著提高。

3.3 三峡电站元件可靠性参数的敏感度分析

由于元件故障参数的统计误差和不确定性, 有必要对元件可靠性参数作敏感度分析, 同时也为工程中元件的选择或改进提供一定的参考。

根据系统可靠性指标对各元件可靠性参数的敏感度, 作出了系统可靠性指标 $LOLP$ 、 $EENS$ 随几种典型元件故障率改变而变化的曲线图, 如图2~图5所示。几种典型元件包括发电机、线路、变压器、断路器, 图中横坐标所表示的数值是故障率的标么值, 代表与前文中所取元件故障率参数的相对值, 纵坐标表示的是系统可靠性指标 $LOLP$ 和 $EENS$ 。

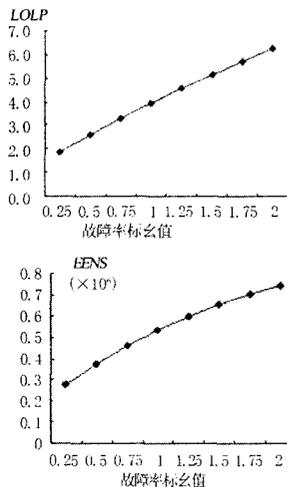


图2 系统可靠性指标对发电机故障率的敏感度

Fig.2 Sensitivity of system reliability indices with generator failure rate

从图2中所示可靠性指标 $LOLP$ 、 $EENS$ 随发电机故障率的变化曲线可知: 发电机故障率增加对系统可靠性指标产生了较大的影响, 当发电机故障率由原来的0.25倍变化到2倍时, 系统的 $LOLP$ 指标也将由原来的0.28倍增加到0.74倍, 说明发电机元件是系统的薄弱环节, 增加投资改善发电机元件的可靠性参数将提高整个方案的可靠性。

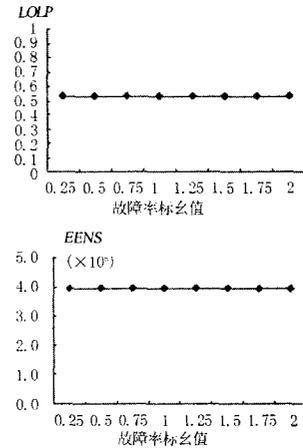


图3 系统可靠性指标对线路故障率的敏感度

Fig.3 Sensitivity of system reliability indices with transmission line failure rate

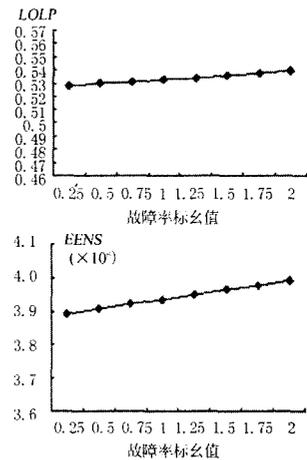


图4 系统可靠性指标对变压器故障率的敏感度

Fig.4 Sensitivity of system reliability indices with transformer failure rate

从图3、图4可以看出, 当出线和变压器的可靠性参数变化时, 可靠性指标 $LOLP$ 、 $EENS$ 基本保持不变, 说明对于当前三峡电站而言, 出线和变压器的可靠性参数对系统可靠性指标影响较小。

从图5可以看出, 当断路器的可靠性参数变化时, 系统可靠性指标 $LOLP$ 和 $EENS$ 均发生变化, 说明断路器的故障率对系统可靠性指标也有一定的影响。

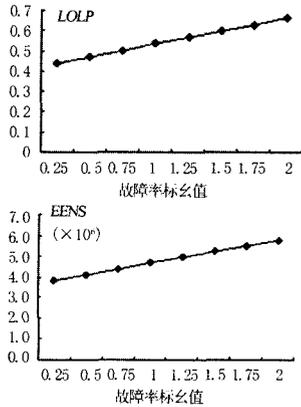


图5 系统可靠性指标对断路器故障率的敏感度

Fig.5 Sensitivity of system reliability indices with breaker failure rate

为了更加清晰、直观地比较各元件故障率对可靠性参数的影响,将发电机、线路、变压器、断路器的可靠性参数随元件故障率的变化趋势加以综合,如图6所示。

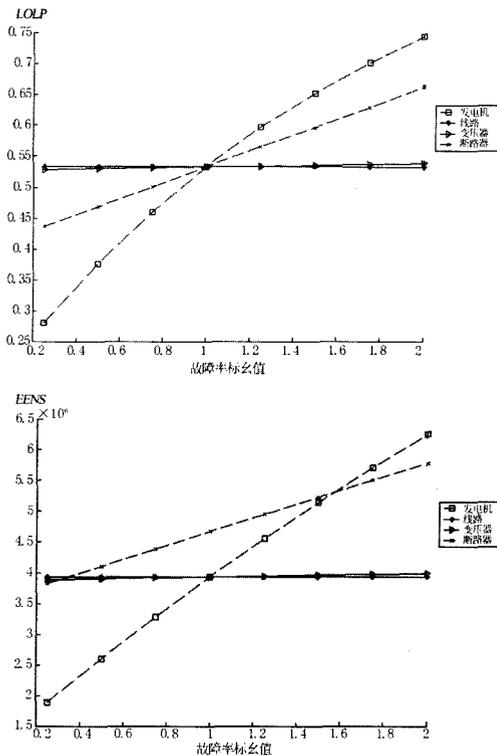


图6 各元件可靠性参数的敏感度分析

Fig.6 Sensitivity analysis of various components reliability parameters

从图6可以看出,对于三峡电站而言,在所列元件中,发电机故障率的变化对系统可靠性的影响最大;其次是断路器,而变压器的故障率变化对系统的可靠性指标影响较小;影响最小的是线路,即

使它的参数成倍改变时, $LOLP$, $EENS$ 的变化仍相当小。因此建议加强对发电机或断路器的投资改进,以提高整个系统的可靠性。

4 结论

本文在综合考虑各种故障模式、运行方式并计及元件容量等因素的基础上,运用统一 $n+2$ 状态马尔可夫模型,对三峡机组投产至2006年(三峡工程二期结束及三期初期)这一典型阶段的三峡电站主接线进行了连续性、充裕性和安全性分析,研究发现:不同负荷水平下系统的可靠性不同,当负荷降到7700 MW时系统的各项可靠性指标都比较理想,当负荷进一步减小时,系统的可靠性并未有显著提高。通过对元件可靠性参数敏感度的分析发现:发电机和断路器的故障率对整个电站的可靠性有显著影响,加强对这部分元件的投资改进,可以明显改善整个系统的可靠性。

合理安排运行方式和检修方式,对提高三峡机组运行稳定性及三峡电力系统的可靠性具有一定的经济效益和社会效应。综合分析水电站主接线与运行方式,负荷变化等的关系也为进一步运行优化决策研究起到一定的促进作用。

参考文献

- [1] 丁功扬. 三峡电站的特点、特性及其在系统中的地位和作用[J]. 电网技术, 2000, 8(24): 1-4.
DING Gong-yang. Features and Characteristics of Three Gorges Plant and Its Position and Effect in Three Gorges Power System[J]. Power System Technology, 2000, 8(24): 1-4.
- [2] 陈国庆. 三峡左岸电站发电设备运行情况分析与稳定措施[J]. 电力设备, 2006, 7(7): 22-26.
CHEN Guo-qing. Operation Condition Analysis and Stability Measures for Power Generation and Transmission Equipment in Three-Gorge Left Bank Power Station[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(7): 22-26.
- [3] 姚登峰. 三峡左岸电站安全经济运行方式研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
YAO Deng-feng. Study of Security and Economical Operation Mode of Three Gorges Left Bank Hydropower Plant[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [4] Reliability criteria of the Western Systems Coordinating Council[R]. 1995, (11).
- [5] NERC. NERC Planning Standards. System adequacy and Security, Disturbance monitoring[S]. September 16, 1997.
- [6] 王锡凡. 我国发电系统可靠性指标研究[J]. 中国电力, 1999, 32(2): 24-28.
WANG Xi-fan. The reliability index study on generation

- system in China. *Electric Power*, 1999, 32(2):24-28.
- [7] 陈文高. 配电网可靠性实用基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998, 111-138.
CHEN Wen-gao. *Basis of Distribution System Reliability* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998:111-138.
- [8] 谢开贵, 尹春元, 周家启. 中压配电系统可靠性评估[J]. 重庆大学学报, 2002, 25(1):53-56
XIE Kai-gui; YIN Chun-yuan; ZHOU Jia-qi. *Reliability Evaluation of Middle Voltage Distribution Networks*[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2002, 25(1):53-56
- [9] Billinton R., Chen Hua, Zhou Jiaqi. Generalized n+2 State System Markov Model for Station-Oriented Reliability Evaluation [J]. *IEEE Transactions on Power System*, 1997,12(4):1511-1517
- [10] Billinton R., Chen Hua, Zhou Jiaqi. Individual Generating Station Reliability Assessment [J]. *IEEE Transactions on Power System*, 1999,14(4):1238-1244
- [11] 陈华, 周家启, 王耀辉. 瀑布沟水电站电气主接线方案可靠性计算[J]. 水电站设计, 1994, (10): 5.
CHEN Hua, ZHOU Jia-qi, WANG Yao-hui. *Reliability calculation of the Chute Dyke Power Station Configuration* [J]. *Design of Hydroelectric Power Station*, 1994, 10(3):67-73
- [12] 谢开贵, 董百强, 赵霞, 周家启. 大型变电站电气主接线可靠性综合分析系统[J]. *电力系统自动化*, 2006, 15(30):89-92
XIE Kai-gui, DONG Bai-qiang, ZHOU Jia-qi. *Design and Application of Reliability Evaluation Software for Power Station*[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 15(30):89-92
- [13] 董百强, 谢开贵, 周家启. 电站 3/2 接线和 4/3 接线的可靠性比较分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(10):10-15
DONG Bai-qiang, XIE Kai-gui, ZHOU Jia-qi. *Comparison and Analysis of Reliability Between 3/2 Connection and 4/3 Connection of Station*[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2006, 29(10):10-15
- [14] Billinton R. 周家启, 任震译. 电力系统可靠性评估[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1986
Billinton R, ZHOU Jia-qi, REN Zhen-yi. *Power System Reliability Evaluation*[M]. Chongqing: Science-Technology & Publication, 1986.

收稿日期: 2008-03-26; 修回日期: 2008-04-23

作者简介:

冯怡(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与可靠性. E-mail: ffyy.33@163.com

(上接第 10 页 continued from page 10)

参考文献

- [1] Horowitz S-H, Phadke A G. Third Zone Revisited[J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2006, 21(1): 23-29.
- [2] Pinto de Sa J, Afonso J, Rodrigues R. A Probabilistic Approach to Setting Distance Relays in Transmission Networks [J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1997, 12(2): 681-686.
- [3] Mir M. Adaptive Vs. Conventional Reach Setting of Digital Distance Relays[J]. *Electric Power Energy Systems*, 1997, 43(2): 105-111.
- [4] Tseng K H, Kao W S, Lin J R. Load Model Effects on Distance Relay Settings[J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2003, 18(4): 1140-1146.
- [5] Xiao Y, Song Y H, Liu C C, et al. Available Transfer Capability Enhancement Using FACTS Devices[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2003, 18(1): 305-312.
- [6] Lu Y, Abur A. Static Security Enhancement Via Optimal Utilization of Thyristor-controlled Series Capacitors[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2002, 17(2): 324-329.
- [7] Fuerte-Esquivel C R, Acha E, Ambriz-Perez H. A Thyristor Controlled Series Compensator Model for the Power Flow Solution of Practical Power Networks[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2000, 15(1): 58-64.
- [8] NERC. Relay Loadability Exceptions: Determination and Application of Practical Relaying Loadability Ratings[R]. www.nerc.com/~filez/spctf.html, 2005.
- [9] 李生虎. 线路距离III段保护动作裕度的节点功率控制算法[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(16): 27-31.
LI Sheng-hu. *Power Injection Control to Operation Margin of Zone 3 Impedance Relay on Transmission Lines*[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(16): 27-31.
- [10] Li Sheng-hu, Yorino N, Ding Ming, et al. Sensitivity Analysis to Operation Margin of Zone 3 Impedance Relays with Bus Power and Shunt Susceptance[J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2008, 23(1): 102-108.
- [11] Mathur R M, Varma R K. *Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems*[M]. New York: IEEE/Wiley; 2002.
- [12] IEEE Reliability Test System Task Force. *IEEE Reliability Test System*[J]. *IEEE Trans on Power Apparatus Systems*, 1979, 98(6): 2047-2054.

收稿日期: 2008-03-25

作者简介:

李生虎(1974-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为电力系统运行与控制、柔性输电、风力发电技术; E-mail: lishenghu2004@hotmail.com

丁明(1956-), 男, 教授, 研究方向为电力系统可靠性、新能源发电、柔性输电。