

考虑可修多状态的输电线路可靠性评估模型

何金定¹, 贺星棋^{2,3}

(1. 云南电力调度中心, 云南 昆明 650011; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;
3. 四川省电力公司直流运行分公司, 四川 成都 610041)

摘要: 为了能够更好地评估输电线路的可靠性, 结合运行实际考虑影响线路可用性的外部因素, 提出用 Markov 模型计算输电线路可靠性指标的方法。在常规的维护、完好状态之外, 通过在模型中考虑日常维护工作对线路可靠性的影响引入待维护状态, 建立能够反映线路当前状态的相应的状态空间图, 并应用状态空间图求解系统的可靠性指标。计算结果表明在一定范围内适当增加线路的日常有效维护能够有效提高线路的可靠性, 对于状态检修的应用有重要的参考意义。

关键词: 电力系统; 输电线路; 可靠性; 马尔可夫

Evaluation model of reliability for overhead transmission line with considerations of repairable multi-state

HE Jin-ding¹, HE Xing-qi^{2,3}

(1. Yunnan Electric Power Dispatching Center, Kunming 650011, China; 2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. DC Operation Branch, Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: A Markov analysis technique is used to calculate reliability measures for overhead transmission line that involve several typical reliability related factors. Considering the effectiveness of routine maintenance, awaiting maintenance state is introduced and state-space graph that can reflect the current running state is established. The calculations of reliability measures can be obtained by state-space graph. The results show that the routine maintenance work within a certain appropriate range can effectively improve the reliability of the line. The technique has important reference value for the practical application of condition-based maintenance.

Key words: power system; transmission line; reliability; Markov

中图分类号: TM726.1 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)04-0011-04

0 引言

电力网的可靠性取决于发、输、变设备的运行可靠性, 输电线路作为电力系统中的重要元件, 它的可靠性与电网的安全稳定运行有着密切的关系。近年来随着各类保护及自动装置可靠性的提高, 输电线路的可用性有了很大的提高, 由文献[1-2]可知在输电线路的事故跳闸次数中, 有很大一部分都是由于雷击引起的瞬时或非永久性故障, 在保护及重合闸装置的正确动作下能够立即恢复运行, 在重合闸不成功的情况下, 通过事故后的马上强送也有很大的可能性能够恢复线路运行, 永久性故障相对瞬时或非永久性故障来说在输电线路的故障中所占比率不大。对于经历了瞬时或非永久性故障后的输电线路, 其运行的状况在一定程度上得到了恶化, 并且实际运行中输电线路处于这一状态的时间跨度也很大, 其抵抗永久性故障的能力或者转移到永久性

故障的概率也与之前不同, 因此对于输电线路的这一状态的忽略将导致可靠性评估结果发生较大的误差。同时, 输电线路可靠性评估作为制定输电线路状态检修策略的基础, 在其上发生的瞬时或非永久性故障对于线路运行状态的综合评估也是一个不可忽略的因素, 因此也非常有必要考虑这一状态。二态系统理论把研究对象看作只有失效和完好两种状态, 忽略了元件及系统处于亚完好状态时对系统性能的影响, 由此建立的可靠性分析模型时常与实际情况存在较大差异。文献[3-10]对于电力系统设备的可靠性从不同角度和方法上进行了评估, 但都是基于故障及运行的两状态模型, 文献[11]虽然从三状态的角度对于电力系统设备的可靠性进行了评估, 但主要考虑的是某一设备发生故障导致非故障设备停运到故障设备完全隔离的情况, 也不适用于输电线路的瞬时或非永久性故障情况。文献[12]中虽然有包含部分失效模式的停运模型, 但仅仅将其应用

于发电机组和超高压直流输电，同时对于遭受非永久性故障的交流输电线路来说，对其最大的影响是抵御故障冲击能力的降低，而非运行在降额状态，因此两者之间有着本质的内涵不同。

本文根据输电线路在遭受各种外界或内部扰动后所处的各种不同状态应用马尔可夫随机过程建立能够反映系统当前状态的相应的状态空间图，然后应用状态空间图求解系统的可靠性指标，最后分析、比较各种因素对输电线路可靠性的影响。

1 输电线路可靠性的三状态计算模型

1.1 输电线路的马尔可夫三状态模型^[13]

输电线路运行过程中受多方面因素的影响，有可能遭受永久性破坏，也有可能遭受非永久性破坏。为了描述输电线路可能处于的各类状态，本文描述的输电线路三状态可靠性模型包括完好状态、待维护状态及维护状态，若采用供电连续性作为可靠性准则，那么当输电线路处于维护状态时系统失效，待维护状态包括线路经历各类瞬时性或非永久性破坏后，线路通过各类自动装置或手动恢复到运行状态，但在此状态下线路上很大程度上会存在一些可靠性已经极大降低的设备，如雷击线路后导致某些绝缘子绝缘强度的降低等，因此这种运行状态与完好状态有明显的不同。输电线路的三状态系统状态转移图如图 1 所示。其中 $\lambda_i, \mu_i (i=1, 2, 3)$ 分别为输电线路发生各种故障的故障率和修复率。对于相应设备的老化问题，在线路各组成部件处于其寿命周期内时，其性能应该不低于出厂标准，即运行于规定使用及维护条件下的合格设备由于时间及设备自身原因导致的自然老化对于整条线路的可靠性不应产生明显的影响；对于由于外部原因如运行条件恶劣、天气、维护不当等因素导致的设备老化，随着老化程度的增加，其运行可靠性的降低对整条线路的影响也将包括在表示各种状态转移概率的 λ_i, μ_i 中，即随着设备运行及维护条件的不同而导致设备的老化程度不同，根据相应统计数据计算出的 λ_i, μ_i 也会相应不同。

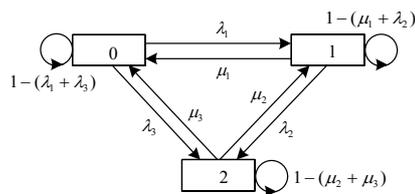


图 1 输电线路三状态马尔可夫状态转移图

Fig.1 Three-state Markov shift figure of transmission line

由图 1 可见，系统的可能状态为：

0 状态——输电线路不存在任何故障或缺陷的状态，由于理想的完好状态在现实世界中是不可能存在的，因此在本文中当所有失效或效能显著降低不能满足运行要求的元件已更换，影响线路运行的所有缺陷已消除，线路各组成部分本身具备确定性的长时间连续正常工作能力时即认为线路处于完好状态。对于由于元件或外部原因所导致的线路不能连续长时间履行其电力输送职能时本文中认为线路具有缺陷，如绝缘子零值等，否则认为无缺陷。

1 状态——输电线路存在一定的缺陷，系统能够维持一段时间的正常工作，但对于继续长时间的正常工作存在很大程度的不确定性；此状态可通过对线路进行常规巡线、零值绝缘子测试等手段及运行中的缺陷统计数据得出，本文中当线路不中断运行但又有明显的缺陷（如跳闸后重合闸成功、线路走廊安全距离不足、绝缘子损坏等）时即认为线路当前处于 1 状态。其中的绝大部分缺陷最终都是通过跳闸后成功的重合闸表现出来。

2 状态——输电线路存在永久故障或为消除故障进行的随机主动消缺动作，处于停运状态。

三种状态间的状态转移概率可由给定时段内由于线路原因导致的线路强迫或计划停运的次数、跳闸次数、重合闸成功次数及各类上报缺陷数据统计得出。其中当线路重合闸成功后认为线路处于 1 状态，重合闸动作不成功或重合闸不动作处于 2 状态，线路上所有已发现缺陷消除后则认为线路处于 0 状态。

系统状态集合为 $S = \{0,1,2\}$ ，系统能够正常工作的状态集合为 $W = \{0,1\}$ ，系统故障即停运状态集合为 $F = \{2\}$ 。系统的状态概率向量为 $X = [x_0, x_1, x_2]$ ，并且满足

$$x_0 + x_1 + x_2 = 1 \tag{1}$$

图 1 相应的转移概率矩阵 P 为：

$$P = \begin{bmatrix} 1 - k_{11} & \lambda_1 & \lambda_3 \\ \mu_1 & 1 - k_{22} & \lambda_2 \\ \mu_3 & \mu_2 & 1 - k_{33} \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中： $k_{11} = \lambda_1 + \lambda_3$ ， $k_{22} = \mu_1 + \lambda_2$ ， $k_{33} = \mu_2 + \mu_3$ 。

1.2 输电线路的可靠性指标计算

设系统稳态可用度为 $A(\infty)$ ，且系统初始状态为完好状态， $p_i(t) = P[X(t) = i] (i = 0,1,2)$ 为 t 时刻线路处于状态 i 的概率。通过联立求解方程式 (3) 及式 (1) 可得系统稳态可用度：

$$X(P-I) = 0 \tag{3}$$

$$A(\infty) = \frac{\lambda_2 \mu_3 + k_{33} \mu_1 - \lambda_3 \mu_3 + k_{33} k_{11}}{\lambda_3 \mu_1 - \lambda_3 \mu_3 + \lambda_2 \mu_3 + \lambda_2 k_{11} + k_{33} \mu_1 + k_{33} k_{11}}$$

线路稳态故障频率

$$F = \sum_{i=0}^k (x_i \sum_{j=k+1}^n a_{ij}) =$$

$$\frac{\lambda_3 \mu_1 k_{33} + \lambda_2 \lambda_3 \mu_3 + \mu_1 \lambda_2^2 + k_{11} k_{33} \lambda_2 - \lambda_2^2 \mu_1 - \lambda_2 \lambda_3 \mu_3}{\lambda_3 \mu_1 - \lambda_3 \mu_3 + \lambda_2 \mu_3 + \lambda_2 k_{11} + k_{33} \mu_1 + k_{33} k_{11}}$$

其中: x_i 为线路处于 i 状态的概率; a_{ij} 为单位时间由 i 状态向 j 状态转移的概率。

考虑线路初始状态得线路的可靠度为:

$$R(t) = p_0(t) + p_1(t) = \frac{(-k_{11} + k_{22} + K_3 + 2\lambda_1)e^{K_1 t} + (k_{11} - k_{22} + K_3 - 2\lambda_1)e^{K_2 t}}{2K_3}$$

其中:

$$K_1 = \frac{-k_{11} + k_{22} - \sqrt{k_{11}^2 - 2k_{11}k_{22} + k_{22}^2 + 4\lambda_1 \mu_1}}{2}$$

$$K_2 = \frac{-k_{11} + k_{22} + \sqrt{k_{11}^2 - 2k_{11}k_{22} + k_{22}^2 + 4\lambda_1 \mu_1}}{2}$$

$$K_3 = \sqrt{k_{11}^2 - 2k_{11}k_{22} + k_{22}^2 + 4\lambda_1 \mu_1}$$

线路的平均首次故障前时间为

$$MTTFF = \int_0^{\infty} R(t) dt = P_0(0)(-B)^{-1} E$$

B 矩阵表示线路在正常工作状态转移到其他正常工作状态的概率, 本文中则为状态 0, 1 之间的转换概率, 因此

$$B = \begin{bmatrix} -k_{11} & \lambda_1 \\ \mu_1 & -k_{22} \end{bmatrix}, E = [1 \quad 1]^T$$

$$\text{所以 } MTTFF = \frac{k_{22} + \lambda_1}{-\lambda_1 \mu_1 + k_{22} k_{11}}$$

2 讨论

线路计划检修停运在本质上来说是由于线路上具有一定瑕疵, 且此类缺陷不能通过带电作业完全消除, 需要停运消缺。以状态检修的观点来看, 检修计划的制定也是由于缺陷已危及线路正常安全运行, 在某种程度上也是一种被迫停运, 将一条处于完好状态的线路计划停运是完全没有意义的。制定计划检修的时间也会因线路当前状态而异, 具有一定的随机性, 因此, 在状态检修看来, 计划检修中线路由运行状态至停运检修状态已经包含于 1 状态到 2 状态的转移之中。此外, 对于因线路两侧站内工作而导致的线路计划停运不属于因线路缺陷而导致的停运, 因此不包含于本文所讨论的线路计划检

修之列, 在对线路运行数据的统计分析中也将忽略该类线路计划停运。

不考虑待维护状态的输电线路两状态系统状态转移图如图 2 所示^[12]。

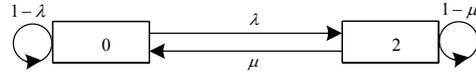


图 2 输电线路两状态转移图

Fig.2 Two-state shift figure of transmission line

仿照前述方法计算此模型下输电线路的可靠性指标如下:

$$A'(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, F' = \frac{\lambda \mu}{\lambda + \mu}, R'(t) = e^{-\lambda t}$$

$$MTTFF' = \frac{1}{\lambda}$$

两个模型之间的比较必须基于一定的共同指标并且应该与实际情况相符, 因此可在假定线路故障率和修复率相同的前提下对两个模型的评估结果进行分析比较。

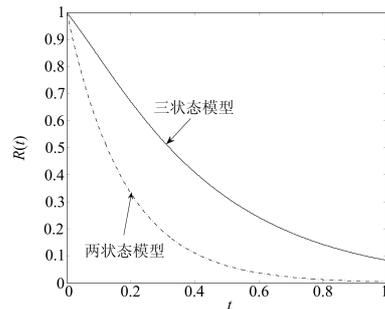


图 3 两种模型可靠度比较

Fig.3 Comparison of two kinds of model reliability

以南方电网某 220 kV 线路 2006~2008 年度运行统计数据为参考, 该线路全长 114.555 km, 经按条次统计分析有 $\lambda_1 = 3$ 次/年, $\lambda_2 = 4$ 次/年, $\lambda_3 = 1.5$ 次/年, $\mu_2 = 1.28$ h/次, $\mu_3 = 16$ h/次, 设线路有效维护工作时间 $\mu_1 = 2$ h/次, 对该线路进行可靠性分析。由图 3 可见, 三状态模型计算的线路可靠度明显高于二状态模型结果, 显然, 由于该模型中的维护活动, 存在完好状态和待维护状态之间的转移, 使得线路可靠度增大, 这也正体现了对线路进行各种维护的结果, 是符合生产实际的, 同时这也是二状态模型的不足之处。

增加线路的日常有效维护能够有效地预防和减少永久性故障的发生, 将表示线路进行预防性维护有效工作量的参数 μ_1 从 2 至 100 进行取值, 得到线路的稳态可用度、故障频率及 MTTFF 的变化曲线

如图 4 所示。可见当 μ_1 增加至 30 左右时各个指标的变化值已经趋于平稳，再增加日常的预防性有效维护工作量对于线路可靠性的提高已经意义不大。其实线路的停运在很大程度上是取决于服从随机变化的各类外部冲击，如雷击、覆冰、地质灾害等各类自然灾害，因此频繁的预防性维护相对来说只是一个辅助因素，所以从这个角度来说这也是符合客观现实世界的生产实际的。

表 1 是线路 λ_2 / λ_1 分别取 1.33、5 及 20 时，稳态可用度、稳态故障频率及 MTTFF 的变化量。图 5 也显示了三种情况下随着有效维护量的增加各个指标的相应变化曲线。由这些数据可知，对于 λ_2 / λ_1 比值较小的线路，适当增加有效维护工作量相较于 λ_2 / λ_1 比值较大的线路来说相对能够取得更好的效

果，即能够更显著地改善线路可靠性的各类评估指标，这个结论对于如何根据线路的实际情况来安排状态检修及日常的维护工作量，提高电网运行的经济性、降低电网的运行成本有着重要的参考意义。

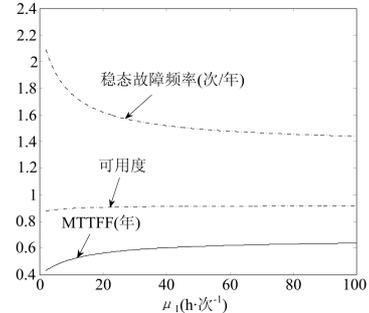


图 4 有效维护量-指标变化曲线

Fig.4 Effective maintenance quantity-target change curve

表 1 可靠性指标变化量

Tab.1 Reliability index of change

序号	μ_1	$\Delta A_{1.33}$	$\Delta F_{1.33}$	$\Delta MTTFF_{1.33}$	ΔA_5	ΔF_5	$\Delta MTTFF_5$	ΔA_{20}	ΔF_{20}	$\Delta MTTFF_{20}$
1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	6	0.012 5	-0.215 7	0.052 9	0.006	-0.106 2	0.036	0.001 1	-0.019 2	0.001 5
3	10	0.006 7	-0.115 6	0.033 7	0.003	-0.048 7	0.018 2	0.000 5	-0.008 2	0.000 6
4	14	0.004	-0.072	0.023 3	0.002	-0.028	0.010 9	0.000 23	-0.004 5	0.000 3
5	18	0.003	-0.049 2	0.017 1	0.001	-0.018 1	0.007 3	0.000 16	-0.002 8	0.000 2

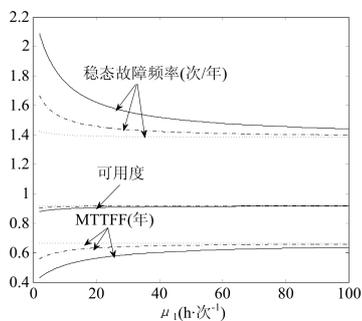


图 5 λ_2/λ_1 -有效维护量-指标变化曲线

Fig.5 λ_2/λ_1 -effective maintenance quantity-target change curve

3 结论

作为电力系统可靠性分析基础的输电线路可靠性评估的结果在电网可靠性分析的结果中占有重要的影响因子，过去的模型往往忽视了一定时间段上的各类外部冲击对降低线路运行状况的累积效果，同时也忽视了日常维护工作对于提高线路可靠性的贡献，本文针对此提出了较现有方法更为完整的并且更加符合电力生产实际的可靠性评估模型，运用马尔可夫随机过程理论导出了输电线路可靠性指标的计算公式，并分析了各类维护策略对线路运行可

靠性的影响，所得结论对于电网运行有着重要的参考价值。结合实际的算例分析验证了本模型的正确性和有效性。

参考文献

- [1] 孔庆东. 送电线路可靠性参数的统计计算[J]. 吉林电力, 1983(1): 20-23.
KONG Qing-dong. Statistical Calculation on the Reliability Parameters of Transmission Line[J]. Jilin Electric Power, 1983(1): 20-23.
- [2] 《中国电力百科全书》编辑委员会, 中国电力出版社《中国电力百科全书》编辑部. 中国电力百科全书—电力系统卷(第 2 版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [3] 任震, 谌军, 黄雯莹, 等. 大型电力系统可靠性评估的模型及算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(5): 25-27, 34.
REN Zhen, CHEN Jun, HUANG Wen-ying, et al. Model and Algorithm of Reliability Evaluation for Large Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(5): 25-27, 34.
- [4] 赵渊, 周家启, 周念成, 等. 大电力系统可靠性评估的解析计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 19-25.

(下转第 53 页 continued on page 53)

- LI Xiao-hui, ZHANG Lai, LI Xiao-yu, et al. The Research on the Evaluation System for Existing Network Based on Analytic Hierarchy Process and Delphi Method [J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(14): 57-61.
- [2] 刘璐洁, 胡荣, 符杨, 等. 基于节约理念的配电网规划方案综合评价[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 66-70. LIU Lu-jie, HU Rong, FU Yang, et al. Comprehensive Evaluation of Resource Economy Based Distribution Network Planning Scheme[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 66-70.
- [3] Anil P, Feng X M, David L. Performance Evaluation of Electric Distribution Utilities Based on Data Envelopment Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 400-405.
- [4] Lo F Y, Chien C F, James T, et al. A DEA Study to Evaluate the Relative Efficiency and Investigate the District Reorganization of the Taiwan Power Company[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 170-178.
- [5] 简志峰. 数据包络分析(DEA)及其在成本收益分析中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [6] 魏权龄. 评价相对有效性的 DEA 方法[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1987.
- [7] 张铁峰, 苑津莎, 王江涛, 等. 基于数据包络分析的配电网线路利用有效性研究[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 97-102.
- ZHANG Tie-feng, YUAN Jin-sha, WANG Jiang-tao, et al. Utilization Availability of Distribution Lines Based on Data Envelopment Analysis[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 97-102.
- [8] 何晓阳, 康庆平, 肖贵申. 基于可靠性成本一效益分析的电网规划[J]. 继电器, 2005, 33(10): 8-11. HE Xiao-yang, KANG Qing-ping, XIAO Gui-shen. Power Network Planning Based on Reliability of Cost-benefit Analysis[J]. Relay, 2005, 33(10): 8-11.
- [9] 韦钢, 吴伟力, 张子阳, 等. 综合考虑可靠性成本与缺电成本的电网规划[J]. 继电器, 2006, 34(17): 38-41. WEI Gang, WU Wei-li, ZHANG Zi-yang, et al. Power Network Planning Considering Reliability Cost and Unserved Energy Cost[J]. Relay, 2006, 34(17): 38-41.

收稿日期: 2009-03-13; 修回日期: 2009-04-21

作者简介:

杨丽徒(1956-), 女, 教授, 博士, 主要从事电力系统运行与规划、电力 GIS 应用方面的教学与研究;

张亮(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统运行与规划方面的研究; E-mail: snakeyueer@163.com

张四清(1964-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统运行与规划管理方面的研究。

(上接第 14 页 continued from page 14)

- ZHAO Yuan, ZHOU Jia-qi, ZHOU Nian-cheng, et al. An Analytical Approach for Bulk Power Systems Reliability Assessment [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 19-25.
- [5] 张宁, 韩富春, 童国力, 等. 架空输电线路运行状态的可靠性评价[J]. 山西电力, 2006(5): 9-10, 15. ZHANG Ning, HAN Fu-chun, TONG Guo-li, et al. Overhead Transmitting Line Operating State Reliability[J]. Shanxi Electric Power, 2006(5): 9-10, 15.
- [6] 韩富春, 张宁, 童国力, 等. 架空输电线路运行状态评估的 FTA 法研究[J]. 太原理工大学学报, 2007, 38(1): 45-47. HAN Fu-chun, ZHANG Ning, TONG Guo-li, et al. The State Evaluation of Overhead Transmission Lines Base on FTA[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2007, 38(1): 45-47.
- [7] 王韶, 周家启. 双回平行输电线路可靠性模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 53-56. WANG Shao, ZHOU Jia-qi. A Reliability Evaluation Model for Two Transmission Lines in Parallel[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 53-56.
- [8] 任震, 梁振升, 黄雯莹. 考虑相关故障的双回输电线路可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(6): 14-17. REN Zhen, LIANG Zhen-sheng, HUANG Wen-ying. Reliability Evaluation of Two Parallel Transmission Lines with Respect to Relevant Fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(6): 14-17.
- [9] Billinton R, Allan R N. 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.
- [10] 郭永基. 电力系统可靠性原理的应用(下)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.
- [11] Endrenyi J. Three-State Models in Power System Reliability Evaluations[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1971, PAS-90(4): 1909-1916.
- [12] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [13] 金星, 洪延姬. 系统可靠性与可用性分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

收稿日期: 2009-03-07; 修回日期: 2009-05-20

作者简介:

何金定(1978-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电网调度运行、电力市场及电能质量、计算机应用等方面的科研、工程工作; E-mail: hejind@163.com

贺星棋(1978-), 男, 博士, 工程师, 长期从事电力系统运行、电网稳定等方面的科研、工程工作。