

基于 FVSI 指标的电压稳定约束无功优化

曲绍杰¹, 高玉领², 邹林³, 刘明波⁴

(1. 吉林省电力有限公司, 吉林 长春 130021; 2. 山东电力超高压公司, 山东 济南 250021;
3. 福建省电力试验研究院, 福建 福州 350007; 4. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 对表征电压稳定性的 FVSI 指标原理进行了探讨, 提出了一种新的电压稳定约束无功优化计算方法, 通过引入调节代价, 将电压稳定指标和网损两个目标函数有效结合, 能够合理协调两者关系, 既提高电压稳定性又降低网损。IEEE 14 和 30 节点系统的计算验证了该方法的有效性和可行性。

关键词: 电压稳定; 无功优化; FVSI 指标; 非线性原对偶内点法

Reactive power optimization with voltage stability margin considered based on fast voltage stability index

QU Shao-jie¹, GAO Yu-ling², ZOU Lin³, LIU Ming-bo⁴

(1. Jilin Electric Power Co.Ltd, Changchun 130021, China; 2. Extra High Power Subcompany of SEPCO, Jinan 250021, China;
3. Fujian Electric Power Tests Research Institute, Fuzhou 350007, China; 4. Electrical Power School, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The paper discusses the theory of FVSI(Fast Voltage Stability Index) and presents a new calculating method to solve the reactive power optimization with voltage stability. The new method combines two objects through introducing price adjustment, which are voltage stability index and power grid loss. At the same time, it could coordinate the two objects reasonably and both increase the voltage stability and decrease the grid losses. IEEE 14 and 30 bus system calculations show that the method is effective and feasible.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50777021).

Key words: voltage stability; reactive power optimization; fast voltage stability index; nonlinear primal-dual inner algorithm

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)10-0010-05

0 引言

当前的电力系统越来越向着大系统、大容量、远距离的方向发展, 为了提高经济效益, 往往会提高电力系统的传输容量, 这样, 电力系统会越来越接近其传输容量极限运行, 极易产生电压稳定问题。研究表明, 电压稳定问题主要是由于电力系统的无功不足引起的, 因此有必要将电压稳定问题和无功优化结合起来研究。至今, 已有一些文献发表^[1-6]。文献[3]以电压稳定作为目标之一进行优化, 但对于多目标之间的关系没有仔细讨论; 文献[4]以潮流收敛时的雅可比矩阵的最小特征值作为电压稳定的指标, 进行优化; 文献[5]以电压稳定 L 指标作为电压稳定的度量加入到无功优化之中; 文献[6]则提出了一种新的模型, 将电压稳定裕度作为一个约束, 通过虚拟一个临界点能够保证系统运行在某个裕度的

附近。当前的研究热点之一是如何表征电压稳定问题并加入到无功优化模型中。

本文通过对快速电压稳定指标 (Fast Voltage Stability Index) 研究, 论证了其表征电压稳定性的可行性和有效性, 并将 FVSI 作为目标函数之一加入到传统的无功规划之中, 通过引入调节代价的概念, 实现两个目标的有效结合, 以实现提高系统的电压稳定性和降低网损的双重目标。最后通过连续潮流法对优化后的系统进行了校验, 表明该指标作为电压稳定的表征是合理的。用 IEEE 14 和 30 系统的计算结果验证所提算法。

1 电压稳定指标 FVSI

至今, 随着对电压稳定问题研究的深入, 人们提出了很多表征电压稳定性的电压指标, 如 Z 指标, L 指标, 雅可比矩阵最小奇异值, FVSI 指标, LQP 指标等等^[1,7-9]。本文详细介绍 FVSI 指标并对其表征电压稳定的有效性进行理论说明。如图 1 所示是

一条线路的简单模型。 $V_1 \angle 0$, $V_2 \angle \delta$ 分别是两端的电压, $P_2 + jQ_2$ 表示支路功率, $R+jX$ 表示支路阻抗。

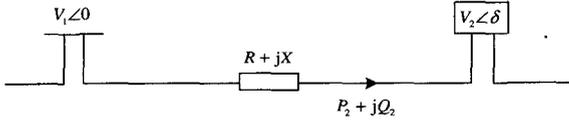


图1 简单线路模型

Fig.1 Simple line model

则在末端节点2的电压 V_2 可以写成式 (1):

$$V_2^2 - \left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta\right) V_1 V_2 + \left(X + \frac{R^2}{X}\right) Q_2 = 0 \quad (1)$$

要保证电压 V_2 有解,则需要保证该二次方程的根判别式 $\Delta \geq 0$, 即:

$$\Delta = \left[\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta\right) V_1\right]^2 - 4\left(X + \frac{R^2}{X}\right) Q_2 \geq 0 \quad (2)$$

通过式 (2) 可以得到:

$$\frac{4Z^2 Q_2 X}{(V_1)^2 (R \sin \delta + X \cos \delta)^2} \leq 1 \quad (3)$$

由于在长线路中, δ 非常小, 所以 $\delta \approx 0$, $R \sin \delta \approx 0$, $X \cos \delta \approx X$, 因此可以得到快速电压稳定指标:

$$FVSI_{ij} = \frac{4Z^2 Q_j}{V_i^2 X} \quad (4)$$

其中: Z 是指支路阻抗, Q_j 指末端的支路无功潮流, V_i 指支路首端电压幅值, X 指支路电抗^[1]。

FVSI 表示支路电压的可解性, 即支路潮流解的存在性, 其值必小于 1。但其大小却可以表示该支路的电压稳定性, 如图 2, 对于一个简单的二次函数 $y = ax^2 + bx + c$, 图像如图 2 所示, 则对于某个特定的 y_0 , 其解 $x = -\frac{b \pm \sqrt{\Delta}}{2a}$, $\Delta = b^2 - 4a(c - y_0)$, 则其对称轴 $x = -b/2a$, 而 $\sqrt{\Delta}$ 的大小则表征了两解距离对称轴的远近程度, 当 $\Delta = 0$ 时此时只有一个解, 对应于电力系统电压稳定的 QV 曲线的鼻型尖点, 即电压崩溃点。所以 Δ 越大, 则说明两解距离越远, 对应于电力系统的电压运行点距离崩溃点越远。即本文推导的 FVSI 指标越小, 则电压解距离崩溃点越远。

又根据基本的电力系统知识 $S = UI^*$ 可知:

$$Q_j = \frac{V_i V_j \sin(\delta + \alpha)}{Z} - \frac{V_j^2 \sin \alpha}{Z} \quad (5)$$

$\alpha = \arccos \frac{R}{Z}$ 是支路阻抗的角度。又因为 $\delta \approx 0$,

$$\text{则 } Q_j = \frac{V_j \sin \alpha}{Z} (V_i - V_j) \quad (6)$$

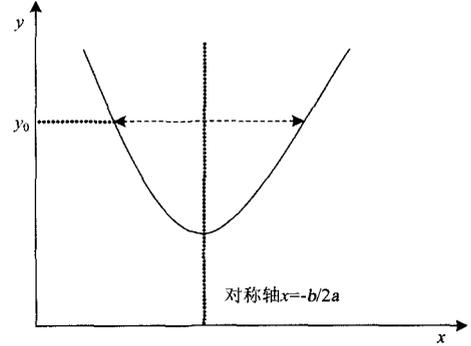


图2 简单的二次函数图像

Fig.2 Image of simple square function

将式 (6) 带入到式 (4) 中得:

$$FVSI_{ij} = 4 \frac{V_j}{V_i} \left(1 - \frac{V_j}{V_i}\right) = 4 \left(\frac{V_j}{V_i} - \frac{V_j^2}{V_i^2}\right) \quad (7)$$

即是推到的 FVSI 指标的解析式。同样地, 当支路为变压器支路时, 其 FVSI 指标的表达式也是相似的。

2 计及电压稳定约束的无功优化数学模型

无功优化在数学上表现为典型的非线性规划问题, 其数学模型可描述为

$$\min f(x, u) \quad (8)$$

$$\text{s.t. } g(x, u) = 0 \quad (9)$$

$$\underline{h} \leq h(x, u) \leq \bar{h} \quad (10)$$

式中: $f(\cdot)$ 为系统的目标函数; 式 (9) 为节点功率平衡方程; 式 (10) 代表节点电压上下限、控制变量的上下限和支路潮流等不等式约束; $u = [Q_G^T, Q_C^T, T_B^T]^T$ 为控制变量列向量, Q_G 为发电机的无功出力列向量, Q_C 为无功补偿设备的无功出力列向量, T_B 为可调变压器的变比列向量; \bar{h} , \underline{h} 分别为相应变量上下限; 设节点 n 为平衡节点, $x = [P_{Gn}, V_1, V_2, \dots, V_n, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}]^T$, 由平衡机的有功出力、节点电压和除平衡节点外的其它节点电压相角构成。

本文中, 网损是用平衡机的有功出力来表示, 当系统的负荷和发电机的有功出力已定时, 系统的网损最小就等价于平衡机的有功出力最小。采用标幺值表示时, 平衡机的有功出力是一个无量纲的量。

将 FVSI 指标作为电压稳定性的表征加入到无功优化目标中,使所有的 FVSI 指标和最小作为目标函数,即系统的电压稳定性越强。FVSI 是一个无量纲的量,因此可以直接与平衡机有功出力相加。为了调节系统的网损和电压稳定性两个目标的关系,本文通过引入调节代价 TD 表示两目标的比重程度。即调节代价 TD 表示为了增大系统的电压稳定性,系统运行时对网损的影响程度。所以目标函数可以表示为:

$$f(x, u) = P_{Gn} + TD \times \sum_{k=1}^{k \leq \text{num_line}} FVSI_{ij} \quad (11)$$

式中: P_{Gn} 为平衡机的有功出力; TD 是为调节代价; k 为第 k 条支路; num_line 为支路数。 $FVSI_{ij}$ 为支路的电压指标, i 为支路的首端, j 为支路的末端。采用原对偶内点法求解上述模型, 详见文献[15]。

3 电压稳定裕度指标

本文选择在临界点(电压崩溃点)运行状态下负荷有功功率与正常运行状态下负荷有功功率之差值作为静态电压稳定裕度的定义^[6]。图 3 给出了某负荷节点电压与负荷有功功率的变化关系 $\lambda - V$ 曲线, A 点为正常工作点, B 点为电压崩溃点。将系统正常工作点 A 与临界点 B 之间的距离定义为电压稳定裕度 α_{VSM} 。通常, 利用连续潮流法求静态电压稳定裕度时, 所有负荷参数 λ 都是同一个变量, 因此电压稳定裕度可以写成:

$$\alpha_{VSM} = [(\lambda_c + 1)P_{10} - P_{10}] / P_{10} = \lambda_c \quad (12)$$

其中: P_{10} 为基本负荷, λ_c 为临界点的负荷参数。

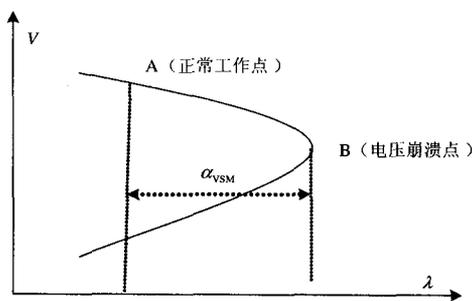


图 3 电压稳定裕度图示

Fig.3 Illustration of voltage stability margin

4 算例分析

将本文所提出的方法分别应用于 IEEE 14 和 30 节点系统。两个系统的参数均采用标么值表示,基准功率都为 100 MVA,内点法的收敛精度为补偿间隙 $gap < 10^{-6}$ 且最大潮流偏差 $< 10^{-3}$, 加速因子

$\beta = 10$ 。所用的优化计算程序用 Visual C++编写。所用计算机为 PentiumIV 1.80 G, 内存 256 M。数据如表 1 所示。

表 1 两个试验系统的基本数据
Tab.1 Basic data of two test systems

系统名称	节点数	支路数	可调变压器数	无功补偿设备数	发电机数	负荷数
IEEE 14 节点系统	14	20	3	3	2	12
IEEE 30 节点系统	30	40	4	9	6	18

4.1 IEEE 14 节点系统结果

在 IEEE14 节点系统中,在 3、6、8 号节点设置无功补偿装置,变压器为 3 台,发电机 1、2 号节点。从表 2 可以看出,经常规无功优化后,系统网损为 1.136 014, FVSI 指标和为 0.950 792,电压稳定裕度为 1.008 17。而采用本文方法优化后,通过代价调节,当 $TD=0.001$ 时,系统网损为 0.136 057,支路 FVSI 之和为 0.888 469,电压稳定裕度为 1.014 11。当增大 TD 时,就是增大系统的电压稳定性,支路 FVSI 之和减少,电压稳定裕度增大,但网损变化不大。因此,可以根据系统对电压稳定性的要求不同,适当调节 TD 使目标更合理、有效。从表中也可以看出,对于 IEEE 14 节点系统,增大系统稳定裕度的幅度有限,原因是该系统规模较小,且负荷不重,其裕度本身很大,较难有较大提高。

表 2 IEEE 14 节点系统结果
Tab.2 Results of IEEE 14-bus system

	常规无功	本文方法		
	优化方法	$TD=0.000 1$	$TD=0.000 5$	$TD=0.001$
迭代次数	9	9	10	9
网损	0.136 014	0.136 014	0.136 023	0.136 057
电压稳定裕度	1.008 17	1.009 17	1.012 34	1.014 11
支路 FVSI 之和	0.950 792	0.947 614	0.931 994	0.888 469

优化前后的各个支路的电压指标比较, B 是常规无功优化后的电压指标的对数值, C 是本文方法 ($TD=0.001$) 优化后的指标对数值,表明本文方法能有效地改善各个支路的电压稳定性。

4.2 IEEE 30 节点系统结果

IEEE 30 节点系统在 12、15、18、19、21、24、26、28、30 号节点设置无功补偿装置,变压器有 4 台,发电机节点为 1、2、5、8、11、13 号节点。从表 3 可以看出,经常规无功优化后,系统网损为

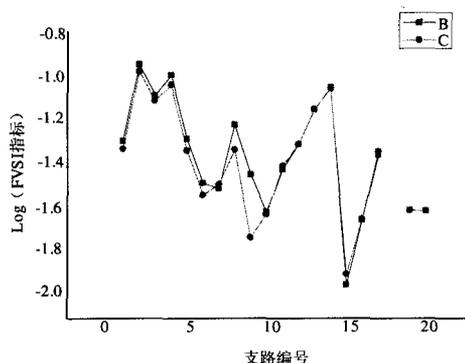


图 4 采用常规无功优化方法和本文方法的 FVSI 指标比较

Fig.4 Comparison of FVSI through conventional reactive optimization method and the proposed method

0.023 069 3, 支路 FVSI 之和为 2.707 366, 电压稳定裕度为 0.893 031。当采用本文方法时 ($TD=0.000 25$) 时, 系统网损为 0.023 072 7, 支路 FVSI 之和为 2.663 176, 电压稳定裕度为 0.933 157。可见本文方法能够提高系统的电压稳定裕度, 并降低支路 FVSI 之和, 改善系统的电压稳定性, 但是以增大网损为代价的。图 5 是用常规优化方法和本文方法计算得到的 FVSI 指标对比。其中, B 表示常规无功优化后电压指标对数值, C 代表本文方法后的电压指标对数值。

表 3 IEEE 30 节点系统结果

Tab.3 Results of IEEE 30-bus system

	常规无功优化方法		本文方法	
	$TD=0.000 5$	$TD=0.000 25$	$TD=0.000 25$	$TD=0.000 05$
迭代次数	12	12	12	12
网损	0.023 0 693	0.023 0 699	0.023 072 7	0.023 069 6
电压稳定裕度	0.893 031	0.927 903	0.933 157	0.927 461
支路 FVSI 之和	2.707 366	2.715 01	2.663 176	2.676 288

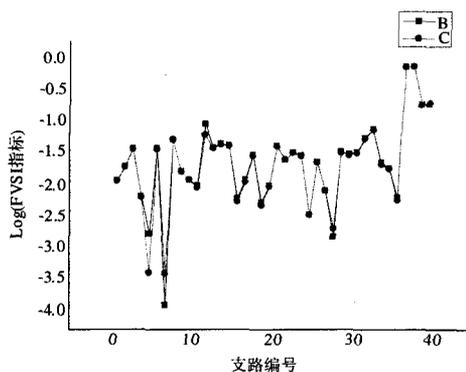


图 5 采用常规无功优化方法和本文方法的 FVSI 指标比较

Fig.5 Comparison of FVSI through conventional reactive optimization method and the proposed method

5 结论

本文探讨了电压稳定性指标 FVSI 指标的原理和有效性。并将该指标作为电压稳定性的代表加入到传统的无功优化中, 引入调节代价来系统网损和电压稳定性两个不同的目标, 能有效地提高系统的电压稳定性, 同时取得较小的网损。适当地调节调节代价能够协调系统的网损和电压稳定性的关系。IEEE 14 和 30 节点系统的试验表明本文方法的有效性。

参考文献

- [1] Musirin I, Abdul Rahman T K. Estimating Maximum Loadability for Weak Bus Identification Using FVSI[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002:50-52.
- [2] 王勤, 方鸽飞. 考虑电压稳定性的电力系统多目标无功优化[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 31-34. WANG Qin, FANG Ge-fei. Multi-objective Reactive Power Optimization Considering Voltage Stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(3): 12-15.
- [3] 熊虎岗, 程浩忠, 李宏仲. 基于免疫算法的多目标无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 102-108. XIONG Hu-gang, CHENG Hao-zhong, LI Hong-zhong. Multi-objective Reactive Power Optimization Based on Immune Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11).
- [4] Thukaram D, Jenkins L, Visakha K. Optimum Allocation of Reactive Power for Voltage Stability Improvement in AC-DC Power Systems[J]. IEEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 2006, 153(2): 237-246.
- [5] Reis C, Maciel Barbosa E P. A Comparison of Voltage Stability Indices[A]. In: IEEE Melecon 2006[C]. Benalmádena (Málaga), Spain: 1007-1010.
- [6] 刘明波, 杨勇. 计及静态电压稳定约束的无功优化规划[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(5): 21-25. LIU Ming-bo, YANG Yong. Optimal Reactive Power Planning Incorporating Steady State Voltage Stability Constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(5): 21-25.
- [7] Vaahedi E, Tamby J, Mansour Y, et al. Large Scale Voltage Stability Constrained Optimal Var Planning and Voltage Stability Applications Using Existing OPF/Optimal Var Planning Tools[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 65-74.
- [8] Venkatesh B, Sadasivam G, Khan M A. A New Optimal Reactive Power Scheduling Method for Loss Minimization and Voltage Stability Margin Maximization Using Successive Multi-Objective Fuzzy LP Technique[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000,

- 15(2): 844-851.
- [9] Rosehart W D, Canizares C A, Quintana V H. Effect of Detailed Power System Models in Traditional and Voltage-Stability-Constrained Optimal Power-Flow Problems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 27-35.
- [10] Rosehart W D, Canizares C A, Quintana V H. Multi-objective Optimal Power Flows to Evaluate Voltage Security Costs in Power Networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 578-587.
- [11] Thukaram D, Jenkins L, Visakha K. Optimum Allocation of Reactive Power for Voltage Stability Improvement in AC-DC Power Systems[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 2006, 153(2): 237-246.
- [12] 李宏仲, 金义雄, 程浩忠, 等. 基于改进粒子群优化算法并计及静态电压稳定性的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 50-55.
LI Hong-zhong, JIN Yi-xiong, CHENG Hao-zhong, et al. Reactive Power Planning Based on Improved Particle Swarm Optimization with Static Voltage Stability[J]. Power System Technology, 2005, 29(22):50-55.
- [13] Chattopadhyay D, Chakrabarti B B. Reactive Power Planning Incorporating Voltage Stability[J]. Int J of Electrical Power & Energy System, 2002, 24(3): 185-200.
- [14] Dong Feng, Chowdhury B H, Mariasa L. Improving Voltage Stability by Reactive Power Reserve Management[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 338-345.
- [15] 刘明波, 程莹, 林声宏. 求解无功优化的内点线性和内点非线性规划方法比较[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(1): 22-26.
LIU Ming-bo, CHENG Ying, LIN Sheng-hong. Comparative Studies of Interior-Point Linear And Nonlinear Programming Algorithms for Reactive Power Optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(1):22-26.
- [16] 赵晋泉, 张伯明. 连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 91-97.
ZHAO Jin-quan, ZHANG Bo-ming. Summarization of Continuation Power Flow and Its Applications in Static Stability Analysis of Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 91-97.
- [17] 江伟, 王成山, 余贻鑫, 等. 直接计算静态电压稳定临界点的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 1-6.
JIANG Wei, WANG Cheng-shan, YU Yi-xin, et al. A New Method for Direct Calculating the Critical Point of Static Voltage Stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10):1-6.
- [18] Carolina M Affonso, Luiz C P da Silva, Flávio G M Lima, et al. MW and MVar Management on Supply and Demand Side for Meeting Voltage Stability Margin Criteria[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3):1538-1545.
- [19] Yoshihiko Kataoka, Yukio Shinoda. Voltage Stability Limit of Electric Power Systems With Generator Reactive Power Constraints Considered[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2):951-962.
- [20] Song Hwachang, Lee Byongjun, Kwon Sae-Hyuk, et al. Reactive Reserve-Based Contingency Constrained Optimal Power Flow (RCCOPF) for Enhancement of Voltage Stability Margins[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4):1538-1546.

收稿日期: 2008-06-30; 修回日期: 2008-08-24

作者简介:

曲绍杰(1982-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统无功优化和电压稳定性分析; E-mail:qushaojie123@163.com

高玉领(1982-), 男, 工程师助理, 从事输电网自动化的研究;

邹林(1983-), 男, 硕士, 从事高压技术及过电压研究。

(上接第9页 continued from page 9)

- [15] Rahimi F A, Lauby M G, Wrubel J N, et al. Evaluation of the Transient Energy Function Method for On-line Dynamic Security Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2): 497-507.
- [16] Aloisio G, Bochicchio M A, LaScala M, et al. A Distributed Computing Approach for Real-time Transient Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 981-987.
- [17] LaScala M, Sblendorio G, Bose A, et al. Comparison of Algorithms for Transient Stability Simulations on Shared and Distributed Memory Multiprocessor[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4):2045-2050.
- [18] Fang D Z, David A K. A Normalized Energy Function for Fast Transient Stability Assessment[J]. Electric Power System Research, 2004, 69: 287-293.
- [19] 房大中, 周保荣, 宋文南, 等. 修正的暂态能量裕度评估策略[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 94-98.
FANG Da-zhong, ZHOU Bao-rong, SONG Wen-nan, et al. Strategy for Assessment of Corrected Transient Stability Margin[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3):94-98.

收稿日期: 2008-06-30; 修回日期: 2008-09-01

作者简介:

石恒初(1983-), 男, 硕士, 从事电网调度运行及继电保护工作。E-mail: hengchu_shi@yahoo.com.cn