基于原 —对偶内点法的区域电网无功能力评估

张希猛[1,2],李华强[1],赵周芳[1],方 勇[1]
(1. 四川大学电气信息学院,四川 成都 610065; 2. 61541部队,北京 100094)

摘 要:提出了区域电网无功能力的概念,定义了无功能力指标,建立了评估区域电网无功能力的数学模型。模型中考虑了电压稳定性、节点电压水平、热稳定等安全约束条件,并用原 —对偶内点法求解。通过对 IEEE 30节点和 IEEE 57节点样本系统的仿真,证明了该方法的有效性和正确性。

关键词:电压稳定;区域电网;无功能力;无功裕度;原 —对偶内点法

Abstract: The concept of reactive capability of regional power grid is proposed, then the index of reactive capability is defined and the mathematical model to evaluate the reactive capability of regional power grid is constructed. The security constraint condition considered in this mathematical model includes the voltage stability, the node voltage profile and the thermal stable constraint. Based on the established model, the primal—dual interior point method is used to calculate the index of reactive capability of regional power grid. The effectiveness and the accuracy of this method are testified by the simulation results of IEEE 30—bus and IEEE 57—bus sample systems.

Key words: voltage stability; regional power grid; reactive capability; reactive margin; primal—dual interior point method
中图分类号:TM714 **文献标识码:**A **文章编号:**1003—6954(2009)04—0028—04

随着电力市场的不断完善和电力改革的深化,对投资效益的追求越来越高,在现有系统传输结构的基础上尽可能多地传送有功功率,可以充分发挥现有传输系统的潜能,有效提高企业的运行效率和经济效益。而提高现有传输系统的传输效率和传输能力,使电力系统运行不断逼近极限,进一步恶化了电力系统的不安全因素。从无功功率的平衡及补偿角度来讲,无功是维持系统电压稳定及节点电压水平和改变潮流分布的重要因素。而电网的运行方式不断在变化,尤其是在事故后,所有无功能否将系统稳定在一个合理的运行水平,是一个非常重要的问题。国内外研究表明[1~4],无功不足是导致系统电压失稳乃至崩溃的主要原因。电压稳定性评估是电力系统中非常重要的任务。无论是在正常运行条件下,或是在事故后状态下,系统都需要维持在一个合适的稳定裕度。影响电网的电压稳定性的因素是由各个控制因素和网络运行因素共同组成的[5,6]。当对电网的电压水平以及电压稳定进行评估时,无功能力很显然会对电压的稳定裕度产生巨大的影响[7]。

目前,国内外许多文献关注于无功优化方面。如文献[8]利用人工神经网络中的 Hopfield连续模型(HNN)来求解电力系统中的无功优化问题。文献[9]用模拟退火法进行无功优化,理论上可以不同时地收敛到全局最优解。文献[10]将 Tabu搜索方法用于电力系统无功优化,结果表明 Tabu搜索方法具有更强的全局寻优能力。文献[11]将原非线性规划模型分解为一系列二次规划子问题,运用拉格朗日法能从不可行点找到原问题的最优解。文献[12]运用内点法的原 —对偶路径跟踪法,求解无功优化非标准形式的线性规划模型,通过消去松弛变量和部分拉格朗日乘子变量,使得在每步迭代中求解的线性方程组系数矩阵为对称矩阵。

但是,国际和国内的论文中鲜有关于电网无功能力的报道。除了上述安全因素之外,电网的无功能力作为辅助服务的重要组成因素,为无功定价以及辅助服务策略提供有效的参考,在这种情况下计算电网的无功能力显得尤为重要。

基于此,提出区域电网的无功能力评价问题。即,现有网络中的无功水平及其无功储备能否保证系统的电压水平、电压稳定及线路热稳定等安全约束,并且在事故后仍然保证上述的约束条件不会被破坏。因此,这里提出了区域电网无功能力指标,建立了指标评价体系的数学模型,并进行了数值仿真。

1 无功能力指标数学模型的建立

1.1 电网无功能力指标

从电网的结构和运行特性可知,电网的各种无功电气元件由发电机、并联电抗(容)器、SVC、变压器、输电线路和负荷组成,其中变压器、输电线路和负荷又是消耗无功的主要因素。伴随网络负荷的增长,在电网输送功率增加的同时,电网消耗的无功也会增加,从而导致系统功率因数降低,电压下降。为稳定电网的电压水平,电网需要大量的无功来支撑电网电压的稳定,并保证向用户输送满足负荷质量要求的电能[13]。因此,在电网负荷增长的过程中,电网的无功储备必须要满足下式安全约束。

$$Q_z > Q_r \tag{1}$$

其中,Q_z为电网当前装备无功容量的最大值;Q_r为电网在重负荷情况下,电网电压可行电压水平范围边界或接近电压崩溃点处为维持电压稳定和电压水平所需的无功容量值。

式中:

$$Q_z = \Sigma Q_{gi} + \Sigma Q_{ci} \tag{2}$$

其中,ΣQ_{gi}为发电机,同步调相机最大无功出力;ΣQ_{ci}为本网并联电容(抗)器组,SVC最大无功出力。

$$Q_r = \Sigma Q_{rgi} + \Sigma Q_{rci} \tag{3}$$

其中,ΣQ_{rgi}为可行电压水平范围边界或接近电压崩溃点处对发电机的无功需求;

ΣQ_{rci}为可行电压水平范围边界或接近电压崩溃点处对本网并联电容(抗)器组,SVC最大无功需求。

$i \in n$　　n为本网节点数

按照区域电网无功能力的定义,无功能力应该是电网中现有的无功元件能够提供的无功容量总和与电网中支持电压水平和电压稳定裕度的所有节点的无功需求容量总和的比值(η)。

即　$$\eta = Q_z / Q_r \tag{4}$$

1.2 区域电网无功能力计算的制约因素

区域电网的无功能力在实际求解时要考虑许多因素的影响,如系统的运行状态、电网结构及负荷需求增长等。除此之外,它的计算还会受到许多约束的制约,如电压水平限制、电压稳定限制和线路热稳定约束等,并且这些安全约束在 N－1事故情况下仍然能够得到保证。

电压水平限制:电能在流经输电线时,通常情况下会导致线路末端的电压降落,而在输电系统中必须时时将各节点的电压维持在一个特定的范围内,以保证供电质量。电压水平限制规定了系统内各节点所能允许的最低、最高电压。

电压稳定极限:区域电网系统可靠性设计的一个基本原则就是要保证系统在发生故障时,能够继续保持可靠的运行。并且 N－1故障下系统的安全约束仍然不能被破坏。

1.3 无功能力指标数学模型

为求解无功需求值,无论是电压水平约束还是电压稳定约束,都可将其归结为非线性规划问题。

$$\min \xi(x)$$
$$\text{s.t.}\begin{cases} f(x,\lambda) = \lambda y_d + h(x) = 0 \\ \underline{G} \leqslant G(x) \leqslant \overline{G} \end{cases} \tag{5}$$

式中,$x \in R^n$为状态控制变量;

$h(x) = [h_1(x), \cdots, h_m(x)]^T$为常规潮流方程;

$G(x) = [G_1(x), \cdots, G_r(x)]^T$为安全约束条件;

$\underline{G}$, $\overline{G}$为安全约束条件上下限;

$\xi(x)$为目标函数。

根据不同的安全约束限制需要建立不同的数学模型。

模型一:电压水平约束和热稳定约束优化模型

$$\min \xi(x)$$
$$\text{s.t.}\begin{cases} h(x) = 0 \\ \underline{V}_i \leqslant V_i \leqslant \overline{V}_i \quad i = 1, \cdots, n \\ \underline{P}_{Gi} \leqslant P_{Gi} \leqslant \overline{P}_{Gi} \quad i \in S_G \\ \underline{Q}_{Ri} \leqslant Q_{Ri} \leqslant \overline{Q}_{Ri} \quad i \in S_R \\ \underline{P}_{ij} \leqslant P_{ij} \leqslant \overline{P}_{ij} \end{cases} \tag{6}$$

式中:

$\xi(x) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} G_{ij}[(f_i - f_j)^2 + (e_i - e_j)^2]$为系统网损。

模型二:电压稳定约束优化模型

$$\min \xi(x)$$
$$\text{s.t.}\begin{cases} f(x,\lambda) = \lambda y_d + h(x) = 0 \\ \underline{P}_{Gi} \leqslant P_{Gi} \leqslant \overline{P}_{Gi} \quad i \in S_G \\ \underline{Q}_{Ri} \leqslant Q_{Ri} \leqslant \overline{Q}_{Ri} \quad i \in S_R \\ 0 \leqslant V_i \leqslant \overline{V}_i \quad i = 1, \cdots, n \end{cases} \tag{7}$$

其中,λ代表系统一定要保持的电压稳定裕度,这里取基态情况下总负载功率的 20%。因此,考虑到系统故障前后的情况,对于所有安全约束的限制,计算区域电网无功能力指标可由式(8)表示。

$$\eta = Q_z / \max\{Q_r \text{by}(6), Q_r \text{by}(7)\} \tag{8}$$

2 原－对偶内点法求解

内点法是 Karmarkar于 1984年提出的一种非线

性规划算法。当前这种方法已经被广泛应用于各种电力系统最优问题中，成为解决优化问题领域的强有力工具，并且实现了线性问题与非线性问题的统一规划[14,15]。

文献[16]、[17]等把内点法用于求解电力系统优化问题。文献[18]、[19]应用原–对偶内点法来求解最优潮流，并推导出了一种新的利用降阶的修正方程式来求解最优问题的有效方法，取得了极大的计算效率。因此，可用该方法作为计算工具，以求得区域电网无功能力。以优化模型一为例，介绍原–对偶内点法的求解步骤。

2.1 原–对偶内点法计算步骤

1)引入松弛变量，将不等式约束转化为等式约束，式(6)可转化为

$$\min \xi(x)$$
$$\text{s.t.}\begin{cases} h(x)=0 \\ G(x)-l-\underline{G}=0 \\ G(x)+u-\overline{G}=0 \end{cases} \tag{9}$$

式中，$(l, u)\in R^r$ 为松弛变量，$(l, u)\geqslant 0$。

2)利用拉格朗日函数法将带约束的优化问题转化为无约束的优化问题，则对应式(9)的拉格朗日函数为

$$L=\xi(x)-y^T h(x)-z^T[G(x)-l-\underline{G}]-\omega^T[G(x)+u-\overline{G}]-\bar{z}^T l-\bar{\omega}^T u$$

式中，$(z, \bar{z}, \omega, \bar{\omega})\in R^r$，$y\in R^m$ 为拉格朗日乘数。

3)因$\dfrac{\partial L}{\partial l}=z-\bar{z}=0$，$\dfrac{\partial L}{\partial u}=-\omega-\bar{\omega}=0$，把KKT条件具体化，得到非线性方程组：

$$\begin{cases} L_x=\nabla\xi(x)-\nabla h(x)y-\nabla G(x)(z+\omega)=0 \\ L_y=h(x)=0 \\ L_z=G(x)-l-\underline{G}=0 \\ L_\omega=G(x)+u-\overline{G}=0 \\ L_l=LZe=0\text{(互补条件)} \\ L_u=UWe=0\text{(互补条件)} \\ (l, u, z)\geqslant 0,\ \omega\leqslant 0,\ y\neq 0 \end{cases} \tag{10}$$

式中，$(L, U, Z, W)\in R^{r\times r}$，对角元素为$(l, u, z, \omega)$的对角阵。$e=[1\cdots 1]^T\in R^r$。为避免在可行域边界出现粘滞现象，用一个扰动系数$\mu$来松弛得到：

$$L_l^\mu=LZe-\mu e=0,\quad L_u^\mu=UWe+\mu e=0$$

式中，$\mu=\sigma C_{Gap}/2r$（$C_{Gap}=\sum_{i=1}^{r}(l_i z_i-u_i\omega_i)$为互补间隙；$\sigma$为设定参数。

4)利用牛顿法来求解方程组(10)，得

$$\begin{cases} \left[\sum_{i=1}^{m}\nabla^2 h_i(x)y_i+\sum_{i=1}^{r}\nabla^2 G(x)(z_i+\omega_i)-\nabla^2\xi(x)\right]\Delta x+\nabla h(x)\Delta y+\nabla G(x)(\Delta z+\Delta\omega)=L_{x0} \\ \nabla h(x)^T\Delta x=-L_{y0} \\ \nabla G(x)^T\Delta x-\Delta l=-L_{z0} \\ \nabla G(x)^T\Delta x+\Delta u=-L_{\omega 0} \\ Z\Delta l+L\Delta z=-L_{l0}^{\mu} \\ W\Delta u+U\Delta W=-L_{u0}^{u} \end{cases} \tag{11}$$

式中，$\nabla^2 h_i(x)$、$\nabla^2 G_i(x)$、$\nabla^2\xi(x)$为$h_i(x)$、$G_i(x)$、$\xi(x)$的Hessian矩阵；y_i，z_i，ω_i分别为y，z，ω的第i个元素。

$(L_{x0}, L_{y0}, L_{z0}, L_{\omega 0}, L_{l0}^{\mu}, L_{u0}^{\mu})$为KKT条件方程的残差。

虽然可对方程组(11)直接进行计算求解，但是为了进一步提高计算速度，采用了对上述方程组进行降阶的计算技巧。由方程组(11)后4个方程式可得

$$\begin{cases} \Delta l=\nabla G(x)^T\Delta x+L_{z0} \\ \Delta u=-(\nabla G(x)^T\Delta x+L_{w0}) \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases} \Delta z=-L^{-1}Z\nabla G(x)^T\Delta x-L^{-1}(ZL_{z0}+L_{l0}^{\mu}) \\ \Delta w=U^{-1}W\nabla G(x)^T\Delta x+U^{-1}(WL_{w0}-L_{u0}^{\mu}) \end{cases} \tag{13}$$

将方程组(12)、(13)代入方程组(11)可得

$$\begin{bmatrix} A & \nabla h(x) \\ \nabla h(x)^T & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}=-\begin{bmatrix} B \\ L_{y0} \end{bmatrix} \tag{14}$$

式中，$A=\left[\sum_{i=1}^{m}\nabla^2 h_i(x)y_i+\sum_{i=1}^{r}\nabla^2 G_i(x)(z_i+w_i)-\nabla^2\xi(x)\right]+\nabla G(x)S\nabla G(x)^T$

$$S=U^{-1}W-L^{-1}Z$$

$$B=\nabla h(x)y-\nabla\xi(x)+\nabla G(x)[U^{-1}WL_{w0}-L^{-1}ZL_{z0}-\mu(U^{-1}-L^{-1})e]$$

2.2 原–对偶内点法的简要程序流程

1)初始化

2)计算互补间隙

$C_{Gap}=\sum_{i=1}^{r}(l_i z_i-u_i w_i)$，若$C_{Gap}<\varepsilon$，则输出全部计算结果，结束；否则，执行步骤3)。

3)计算扰动系数：$\mu=\sigma C_{Gap}/2r$，式中σ为设定的参数，可影响计算收敛的速度。

4)求解方程组(14)，得到$[\Delta x, \Delta y]$，并代入式(12)、(13)以求解$[\Delta l, \Delta u, \Delta z, \Delta w]$。

5)确定在原–对偶空间中最大步长

$$P_{step}=0.9995\min\left\{\min\left(\frac{-l_i}{\Delta l_i}:\Delta l_i<0;\frac{-u_i}{\Delta u_i}:\Delta u_i<0\right),1\right\}$$

$$D_{step}=0.9995\min\left\{\min\left(\frac{-z_i}{\triangle z_i};\triangle z_i<0;\frac{-w_i}{\triangle w_i};\triangle w_i>0\right),1\right\}$$

6)更新原始和对偶变量

$$\begin{bmatrix}x\\l\\u\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x\\l\\u\end{bmatrix}+P_{step}\begin{bmatrix}\triangle x\\\triangle l\\\triangle u\end{bmatrix},\begin{bmatrix}y\\z\\w\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}y\\z\\w\end{bmatrix}+D_{step}\begin{bmatrix}\triangle y\\\triangle z\\\triangle w\end{bmatrix}$$

转步骤 2)。

3 算例分析

3.1 算法步骤

1)建立和计算基本潮流方程;

2)用 PDIPM计算式(6),得出故障前系统在电压水平约束和热稳定约束条件下的无功需求值 $Q_r=\Sigma Q_i$;

3)用 PDIPM计算式(7),得出故障前系统在电压稳定约束条件下的无功需求值 $Q_r=\Sigma Q_i$;

4) $Q_{rpre}=\max\{Q_r by(2), Q_r by(3)\}$;

5)用 PDIPM计算式(6),得出故障后系统在电压水平约束和热稳定约束条件下的无功需求值 $Q_r=\Sigma Q_i$;

6)用 PDIPM计算式(7),得出故障后系统在电压稳定约束条件下的无功需求值 $Q_r=\Sigma Q_i$;

7) $Q_{rloss}=\max\{Q_r by(5), Q_r by(6)\}$;

8)求解电网的无功能力水平值:

$\eta=Q_z/\max\{Q_{rpre}, Q_{rloss}\}$。

3.2 算例仿真

用前面的方法对 IEEE 30、IEEE 57母线系统的仿真来验证本方法的性能。

按照 IEEE 30系统,系统当前 $Q_z=3.64$。

按照 IEEE 57系统,系统当前 $Q_z=6.212$。

在静态情况下仿真,故障前结果见表 1。

表 1 系统故障前无功需求值

考虑不同约束条件下	IEEE 30 Q_r	IEEE 57 Q_r
电压水平约束	1.708 2	2.836 8
电压稳定约束	2.286 8	3.675 2

因此,系统故障前在 IEEE 30母线系统下:

$Q_{rpre}=\max\{1.708 2, 2.286 8\}=2.286 8$

在 IEEE 57母线系统下:

$Q_{rpre}=\max\{2.836 8, 3.675 2\}=3.675 2$

表 2、表 3分别给出了发生 N-1故障情况下,考虑电压水平约束和电压稳定约束的仿真结果。

表 2 考虑电压水平约束的无功需求值

IEEE 30 开断支路号	IEEE 30 Q_r	IEEE 57 开断支路号	IEEE 57 Q_r
5	2.113 0	8	3.481 2
1	1.997 1	53	3.437 3
2	1.951 8	25	3.085 2
4	1.951 4	15	3.075 7
9	1.871 9	1	3.005 8

表 3 考虑电压稳定约束的无功需求值

IEEE 30 开断支路号	IEEE 30 Q_r	IEEE 57 开断支路号	IEEE 57 Q_r
1	2.781 1	58	4.238 5
5	2.735 0	8	4.231 8
7	2.653 2	44	4.081 3
2	2.543 3	15	4.051 2
8	2.523 6	55	4.035 6

在 IEEE 30母线系统下:

$$Q_{r(N-1)}=\max\begin{Bmatrix}5, 2.113 0\\1, 2.781 1\end{Bmatrix}=(1, 2.781 1)$$

上式为:(开断支路编号,无功需求值)

$Q_r=\max\{Q_{rpre}, Q_{r(N-1)}\}$

$=\max\{2.286 8, 2.781 1\}=2.781 1$

$\eta=Q_z/Q_r=3.64/2.781 1=1.308 8$

在 IEEE 57母线系统下:

$$Q_{r(N-1)}=\max\begin{Bmatrix}8, 3.481 2\\58, 4.238 5\end{Bmatrix}=(58, 4.238 5)$$

上式为:(开断支路编号,无功需求值)

$Q_r=\max\{Q_{repe}, Q_{r(N-1)}\}$

$=\max\{3.675 2, 4.238 5\}=4.238 5$

$\eta=Q_z/Q_r=6.212/4.238 5=1.465 6$

4 结 论

前面提出了一种考虑电网电压水平、电压稳定及线路热稳定约束情况下求解区域电网无功能力的计算方法,建立了区域电网无功能力指标,并在各种预想的 N-1网络故障情况下,利用原-对偶内点法进行求解,得到了在电压水平约束、热稳定约束和电压稳定约束情况下区域电网的无功能力值。通过对 IEEE 30、IEEE 57母线系统的仿真计算,证明了此方法的准确性和有效性。因此,所提算法以及相关的计算结果,可以快速地对现有电网的无功能力进行评估。

(下转第 56页)

[12] 段登伟,刘俊勇.基于不完全信息静态博弈论的购电商竞价策略研究[J].电力自动化设备, 2003, 23(7): 10-14.
[13] 陈星莺,李华昌,廖迎晨,刘皓明.不完全信息下的供电公司最优竞价策略[J].电力需求侧管理, 2006, 8(4): 12-15.
[14] Alvarado F L. The stability of Power System Markets. IEEE Trans on PWRS, 1999, 14(2).
[15] 谭忠富,董福贵,刘严.博弈论在大用户与发电公司直接购电合同中的应用[J].华北电力大学学报, 2004, 31(3): 62-64.
[16] 陈刚,王超,谢松.基于博弈论的电力大用户直接购电交易研究[J].电网技术, 2001, 28(13): 75-79.
[17] Geeli. Negotiation Models for Electricity Pricing in a Partially Deregulated Electricity Market. In: IEEE PES Summer Meeting Seattle(USA). 1999.
[18] 刁勤华,林济铿,倪以信,陈寿孙.博弈论及其在电力市场中的应用[J].电力系统自动化, 2001, 25(1): 19-23; 5(2): 13-18.
[19] 刘观起,张建,刘瀚.基于用户对电价反应曲线的分时电价的研究[J].华北电力大学学报, 2005, 32(3): 23-27.

作者简介：

孙　琳 (1982-),女,成都人,硕士研究生,主要从事电力市场方面的研究。

刘俊勇 (1963-),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,主要从事电力市场、分布式发电等方面的研究工作。

(**收稿日期**: 2009-06-01)

(上接第 31页)

参考文献

[1] Zobian A, Ilic M D. A Steady state Voltage Monitoring and Control Algorithm Using Localized Least Square Minimization of Load Voltage Deviations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 929-938.
[2] MAO Jian-feng, ZHAO Qian-chuan, Christos G. Optimal Dynamic Voltage Scaling in Power-Limited Systems with Real-time Constraints[A]. 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004, 1472-1477.
[3] 包黎昕,段献忠,何仰赞.状态空间中电压稳定性的动态分析[J].中国电机工程学报, 2001, 21(5): 17-22.
[4] Zeng Y G, Berizzi A, Marannino P. Voltage Stability Analysis Considering Dynamic Load Model[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control Operation and Management, 1997, 396-401.
[5] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,王小海.电力系统电压稳定性及其控制[M].中国电力出版社.
[6] Obadina O. O, Berg G. J. Determination of Voltage Stability Limit in Multimachine Power System. IEEE Trans On PWRS, 1988, 3(4).
[7] 王锡凡,方万良,杜正春.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社, 2004.
[8] 王永骥,涂键.神经元网络控制[M].机械工业出版社, 1999.
[9] Hsiao Y T, Liu C C, Chiang H D, et al. A New Approach for Optimal VAR Sources Planning in Large Scale Elctric Power Systems[J]. IEEE Trans On Power Systems, 1993, 8(3): 1024-1032.
[10] 刘玉田,马莉.基于 Tabu搜索方法的电力系统无功优化[J].电力系统及其自动化学报, 2000, 24(2): 61-64.
[11] Burchett R C, Kapp H H, Vierath D R. Quadratically Convergent Optimal Power Flow[J]. IEEE Trans On Power Apparatus and Systems, 1984, 103(11): 3267-3276.
[12] 刘明波,程劲晖,陈学军.电力系统无功综合优化的线性规划内点法[J].电力系统及其自动化学报, 1999, 11(5): 87-92.
[13] 周双喜,姜勇,朱凌志.电力系统电压静态稳定性指标述评[J].电网技术, 2001, 25(1): 1-7.
[14] 李亚男,张粒子,杨以涵。考虑电压约束裕度的无功优化及其内点解法[J].中国电机工程学报, 2001, 21(9): 1-4.
[15] 刘明波,陈学军.电力系统无功优化的改进内点算法[J].电网技术, 1998, 22(3): 24-28.
[16] 王良缘,吴政球,傅海燕等.电力市场中基于内点法的含暂态稳定约束的最大可用输电能力计算[J].电力系统及其自动化学报, 2004, 16(1): 28-33.
[17] 袁越,久保川淳司,佐佐木博司.考虑暂态稳定约束的可用传输能力计算[J].电力系统自动化, 2004, 28(10): 34-39.
[18] 李华强,刘亚梅,N. Yorino 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估[J].中国电机工程学报, 2005, 25(24): 56-60.
[19] 范勇,李华强,曾勇波.基于内点法的可用传输能力计算[J].四川师范大学学报, 2006, 29: 149-151.

作者简介

张希猛 (1976-),男,河北南皮人,汉族,在读研究生,工程师,主要研究方向电压稳定及电压无功控制;

李华强 (1965-),男,教授,博士,从事电压稳定及无功优化问题研究;

赵周芳 (1983-),女,硕士在读,主要从事电压稳定方面的研究;

方　勇 (1968-),男,博士在读,主要从事电能质量方面的研究。

(**收稿日期**: 2009-02-23)