

计及静态电压稳定约束的无功优化规划

刘明波¹, 杨 勇²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640; 2. 广东省广电集团有限公司佛山供电分公司, 广东省佛山市 528000)

摘要: 选择无功补偿设备投资和系统有功网损的综合费用作为目标函数, 同时考虑满足电压水平和电压稳定性两个约束条件来探讨无功规划问题。选取用电压稳定裕度不低于某一个允许的最小稳定裕度来表示电压稳定约束。分别对正常运行工作点和电压崩溃点引入 2 组变量和潮流方程, 从而使得电压稳定裕度可以用临界运行状态下负荷的总视在功率与正常运行状态下负荷的总视在功率之差来显式表达。该模型相对于传统无功规划模型的优势表现在能够根据稳定裕度的目标值直接求得在合理电压水平下的最佳无功补偿配置方案, 但其优化模型的等式和不等式约束及变量的数目却大幅增加, 使得计算量远大于传统的无功规划问题。在 IEEE 14 节点和 118 节点 2 个试验系统的计算表明, 采用非线性原对偶内点法求解该模型时, 其计算精度及收敛性都比较好。

关键词: 无功规划; 电压稳定裕度; 非线性内点法

中图分类号: TM715; TM744

0 引言

传统的无功规划问题以系统的有功损耗或综合投资费用为目标, 通过给定节点电压范围, 来满足安全条件的约束, 确定补偿地点及容量。当系统的传输容量有足够的裕度时, 这种只考虑经济效益和基本运行约束条件的做法是适当的。然而, 随着电力系统的不断发展, 负荷迅速增加, 远方电源供电比重增大, 以致在负荷高峰期传输容量有可能接近极限, 增加了出现电压崩溃并发展为全网性事故的可能性。因此, 有必要同时从维持合理的电压水平和确保电压稳定性两个方面探讨无功规划问题。迄今, 已有一些学者开展了这方面的研究, 取得了大量有价值的研究成果^[1~9]。

本文以文献[7, 8]为基础, 借助电压稳定裕度的概念, 进一步探讨计及静态电压稳定约束的无功优化规划问题的建模和优化算法。

1 电压稳定裕度定义

图 1(a) 给出了一个恒定电压源向一个恒定功率负荷供电的两节点系统。在假定负荷功率因数恒定的情况下, 图 1(b) 给出了负荷节点电压与负荷视在功率的变化关系, 即 $S-V$ 曲线, B 点为电压崩溃点。通常, 将系统正常运行工作点 A 与电压崩溃点

B 之间的距离定义为电压稳定裕度 (VSM, 下文用 M_{vsm} 表示)。

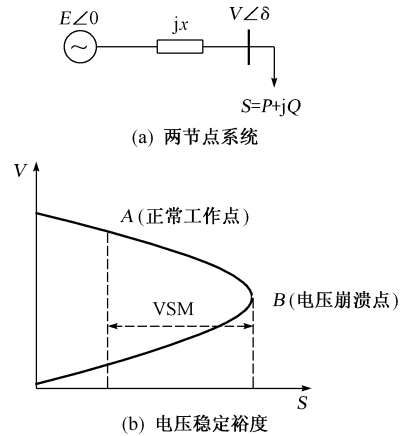


图 1 两节点系统及其电压稳定裕度
Fig. 1 Two-bus system and its voltage stability margin illustration

在复杂电力系统中, VSM 可以类似地定义为: 临界运行状态下负荷的总视在功率与正常状态下负荷的总视在功率之差再与临界状态下总负荷视在功率的比值, 即

$$M_{\text{vsm}} = \frac{S^L - S^N}{S^L} \quad (1)$$

因此, 电压稳定约束可以表示为:

$$M_{\text{vsm}} = \frac{S^L - S^N}{S^L} \geq M_{\text{vsm}}^{\text{spec}} \quad (2)$$

式中: S^L, S^N 分别为临界状态和正常状态下所有负荷的视在功率之和; $M_{\text{vsm}}^{\text{spec}}$ 为允许的最小稳定裕度 ($0 < M_{\text{vsm}}^{\text{spec}} < 1$)。

稳定裕度的计算方法主要有:直接法、连续潮流法和优化算法。其中,优化算法可以考虑各种限制,可以便于找出提高电压稳定裕度的控制方式。本文采用优化算法计算稳定裕度,其核心是如何准确计算临界运行状态下负荷的总视在功率 S^L 。在电网结构给定的情况下, S^L 的大小与下列因素有关:①正常状态下所有负荷的视在功率及其功率因数;②从系统运行点过渡到电压崩溃点的过程中的负荷增长方式;③可调发电机的有功和无功功率出力范围;④无功补偿设备的安装地点和容量;⑤可调变压器分接头位置。其中,因素①中的参数是已知的,③~⑤中涉及到的控制变量可以通过优化计算求得,唯独②中的负荷增长方式需要事先设定。

电力系统从正常运行状态向临界状态的过渡方式可以有单负荷节点增加负荷的方式、多负荷节点增加负荷的方式和全网增加负荷的方式。采用不同的负荷增长方式可能会得出不同的静态电压稳定裕度。当负荷增长方式确定以后,其临界点也就惟一确定。在本文研究中,假定各节点负荷视在功率按照以下方式增加,且分别保持各负荷节点的功率因数不变:

$$S_i = S_i^N + \beta_i \left(\sum_{i \in J_L} S_i - \sum_{i \in J_L} S_i^N \right) \quad (3)$$

因此,在临界点处则有:

$$S_i^L = S_i^N + \beta_i \left(\sum_{i \in J_L} S_i^L - \sum_{i \in J_L} S_i^N \right) = S_i^N + \beta_i (S^L - S^N) \quad (4)$$

式中: J_L 为所有负荷节点的集合; S_i 表示节点 i 处的负荷视在功率; S_i^N 和 S_i^L 分别表示正常状态时和临界状态时的节点 i 处的负荷视在功率; β_i 为负荷分配因子,在本文中取为:

$$\beta_i = \frac{S_i^N}{S^N} \quad (5)$$

2 计及电压稳定裕度约束的无功规划模型

本文重点研究在无功补偿设备安装地点已经给定的情况下计算无功补偿设备的最佳安装容量问题,从而将无功优化规划问题用一个连续的非线性规划模型来描述。因此,计及电压稳定裕度约束的无功规划问题可以描述为:在电力系统的结构参数、负荷及除平衡点外其他有功电源的有功出力给定的条件下,以降低综合投资费用为目标,在维持电网在一个合理的电压水平和保证静态电压稳定的条件下,确定无功补偿设备的最佳安装容量。

2.1 变量定义

为讨论问题方便,将所有变量分为 3 类:①与正

常运行和临界运行状态均有关的变量,定义为公用变量;②描述正常运行状态的变量;③描述临界运行状态(电压崩溃点)的变量。

1)公用变量: Q_{Ci} 为节点 i 需要安装的并联电容器组容量; T_{Ki} 为第 i 台可调变压器的变比。

2)描述正常运行状态的变量: V_i^N, θ_i^N 分别为节点 i 处的电压幅值和相角,对于平衡节点,其相角为 0; P_{Gi}^N, Q_{Gi}^N 分别为节点 i 处的发电机有功功率和无功功率, P_{Gi}^N 在无功规划问题中为已知量(平衡发电机的 P_{slack}^N 除外); $P_{LDi}^N, Q_{LDi}^N, S_i^N$ 分别为节点 i 处的负荷有功功率、无功功率和视在功率,在正常运行状态下为已知量; S^N 为总的负荷视在功率, $S^N = \sum_{i \in J_L} S_i^N$ 。

3)描述临界运行状态的变量: V_i^L, θ_i^L 分别为节点 i 处的电压幅值和相角,对于平衡节点,其相角为 0; P_{Gi}^L, Q_{Gi}^L 分别为节点 i 处的发电机有功功率和无功功率; $P_{LDi}^L, Q_{LDi}^L, S_i^L$ 分别为节点 i 处的负荷有功功率、无功功率和视在功率; S^L 为总的负荷视在功率, $S^L = \sum_{i \in J_L} S_i^L$ 。

2.2 目标函数

选择无功设备投资和系统有功网损的综合费用作为目标函数^[10],即

$$f' = B\tau_{\max} P_{\text{loss}}^N S_B + \sum_{i=1}^r \frac{1}{Y} (C_i Q_{Ci} S_B) \quad (6)$$

式中: B 为修正后的有功电价; $\tau_{\max}$ 为全网的年最大负荷利用小时数; Y 为补偿设备的使用年限; P_{loss}^N 为正常状态下系统总的有功损耗; r 为待装无功补偿设备的数目; C_i 为第 i 个可能补偿地点补偿设备的经过修正的单位容量的价格; Q_{Ci} 为待安装的电容器容量; S_B 为基准功率。

目标函数也可写为:

$$f = \alpha P_{\text{loss}}^N + \sum_{i=1}^r (C_i Q_{Ci}) \quad (7)$$

式中: $\alpha = B\tau_{\max} Y$; $f = Yf' / S_B$ 。

2.3 等式约束

对于 n 节点系统,正常运行状态下潮流方程为:

$$P_{Gi}^N - P_{LDi}^N - V_i^N \sum_{j=1}^n V_j^N (G_{ij}^N \cos \theta_{ij}^N + B_{ij}^N \sin \theta_{ij}^N) = 0 \quad (8)$$

$$Q_{Gi}^N - Q_{LDi}^N + Q_{Ci} - V_i^N \sum_{j=1}^n V_j^N \cdot (G_{ij}^N \sin \theta_{ij}^N - B_{ij}^N \cos \theta_{ij}^N) = 0 \quad (9)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ 。

临界状态下的潮流方程为:

$$P_{Gi}^L - P_{LDi}^L - V_i^L \sum_{j=1}^n V_j^L (G_{ij}^L \cos \theta_{ij}^L + B_{ij}^L \sin \theta_{ij}^L) = 0$$
(10)

$$Q_{Gi}^L - Q_{LDi}^L + Q_{Ci} - V_i^L \sum_{j=1}^n V_j^L \cdot (G_{ij}^L \sin \theta_{ij}^L - B_{ij}^L \cos \theta_{ij}^L) = 0$$
(11)

式中: $i=1,2,\cdots,n$ 。

2.4 公用变量的上下限不等式约束

$$Q_{Ci\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci\max}$$
(12)

$$T_{Ki\min} \leq T_{Ki} \leq T_{Ki\max}$$
(13)

2.5 正常运行状态下的不等式约束

$$Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi}^N \leq Q_{Gi\max}$$
(14)

$$P_{slack,\min} \leq P_{slack}^N \leq P_{slack,\max}$$
(15)

$$V_{i\min} \leq V_i^N \leq V_{i\max}$$
(16)

式中:下标 slack 表示平衡发电机。

2.6 临界运行状态下的不等式约束

$$Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi}^L \leq Q_{Gi\max}$$
(17)

$$P_{Gi\min} \leq P_{Gi}^L \leq P_{Gi\max}$$
(18)

2.7 电压稳定裕度约束

由式(2)和式(4),可以得到临界状态下各负荷节点的视在功率值应满足如下约束条件:

$$S_i^L \geq S_i^N + \frac{M_{vsm}^{spec}}{1 - M_{vsm}^{spec}} \beta_i S^N$$
(19)

3 优化算法

假设所研究的电力系统有 n 个节点, p 个负荷节点, m 台可调发电机, r 个节点安装了无功补偿设备, t 台可调变压器, 从式(7)~式(19)表示的数学模型可见, 计及电压稳定约束的无功规划模型包括了 $4n$ 个潮流方程, $(n+3m+p+r+t+1)$ 个具有上下限约束的不等式约束, 变量数目为 $(4n+3m+p+r+t-1)$ 。如果不考虑电压稳定约束, 其无功规划模型由式(7)~式(9)、式(12)~式(16)构成, 该模型包括了 $2n$ 个潮流方程, $(n+m+r+t+1)$ 个具有上下限约束的不等式约束, 变量数目为 $(2n+m+r+t)$ 个。可见, 与传统的无功规划模型相比, 计及电压稳定约束的无功规划模型增加了 $2n$ 个等式约束、 $(2m+p)$ 个不等式约束、 $(2n+2m+p-1)$ 个变量。因此, 求解计及电压稳定约束的无功规划模型的难度明显增加。本文采用具有二阶收敛性的直接非线性原对偶内点算法求解该模型, 具体的求解步骤和方法参见文献[11,12]。

4 算例

选择 IEEE 14 和 118 节点系统作为试验系统, 其基本数据如表 1 所示, 基准功率均取 100 MVA。

式(7)中的 α 和 C_i 取值如下: $C_i=23\ 000$ 元/Mvar; $B=600$ 元/(MW·h), $\tau_{\max}=3\ 600$ h/年, $Y=10$ 年, 由此得出 $\alpha=B\tau_{\max}Y=2.16\times10^7$ 元/MW。

采用非线性内点法求解由式(7)~式(19)表示的优化模型的收敛判据为^[12]: 补偿间隙小于 10^{-6} , 且最大潮流偏差小于 10^{-3} 。

表 1 试验系统的基本数据
Table 1 Basic data of test system

系统名称	节点数	支路数	可调变压器数	并联补偿电容器数	发电机数	负荷数
IEEE 14 节点系统	14	20	3	3	2	10
IEEE 118 节点系统	118	179	8	10	36	72

4.1 IEEE 14 节点系统的计算结果

图 2 给出了 IEEE 14 节点系统接线图, 分别在节点 3、6 和 8 安装并联电容器, 发电机 1 为平衡机。表 2 列出了 IEEE 14 节点系统发电机有功功率、无功功率和并联电容器容量上下限, 其他变量的上下限如下: 可调变压器的变比变化范围为 0.9~1.1, 各节点电压幅值的变化范围为 0.95~1.05。

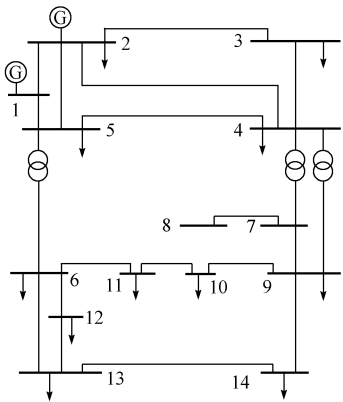


图 2 IEEE 14 节点系统接线图
Fig. 2 Connection diagram of IEEE 14-bus system

表 2 IEEE 14 节点系统发电机有功功率、无功功率和并联电容器容量上下限
Table 2 Limits on active power, reactive power of generators and capacity of shunt capacitor banks in IEEE 14-bus system

变量	设备及运行限制		变量	设备及运行限制	
	下限	上限		下限	上限
P_{G1}	0.030 00	3.700 00	Q_{C3}	0.000 00	0.800 00
P_{G2}	0.005 00	0.520 00	Q_{C6}	0.000 00	0.840 00
Q_{G1}	-0.600 00	1.200 00	Q_{C8}	0.000 00	0.840 00
Q_{G2}	0.000 00	0.300 00			

表 3 列出了当允许的最小稳定裕度 M_{vsm}^{spec} 分别为 0.2 和 0.3 时, 发电机有功出力、无功出力、负荷视在功率总和、并联电容器容量及可调变压器变比的最优值。在本文研究中, 稳定裕度增大, 亦即表示临界运行状态下的负荷视在功率增大。当稳定裕度

为 0.2 和 0.3 时,在临界运行状态下发电机无功出力 和 并 联 电 容 器 容 量 之 和 分 别 为 2.315 6 和 2.558 2,随着稳定裕度的增大而增加。表 4 列出了 各节点电压的最优值。当稳定裕度由 0.2 变化到 0.3 时,在无功补偿处(节点 3,6 和 8 处)的电压幅 值增加。当稳定裕度为 0.2 时,系统最低电压所在 节点为 3,其值为 1.004 96,这是因为该节点附近区 域为重负荷区域;当稳定裕度为 0.3 时,系统最低电 压所在节点为 5,其值为 0.975 19,与在稳定裕度为 0.2 时的电压 1.022 69 相比,其幅值有所降低。

表 3 IEEE 14 节点系统发电机有功出力、无功出力、负荷 视在功率总和、并联电容器容量、可调变压器变比的 最优值及迭代次数

变量	$M_{\text{vsm}}^{\text{spec}}=0.2$		$M_{\text{vsm}}^{\text{spec}}=0.3$	
	正常工作点	临界工作点	正常工作点	临界工作点
P_{G1}	2.328 08	3.250 720	2.342 55	3.449 90
P_{G2}	0.400 00	0.446 650	0.400 00	0.520 00
Q_{G1}	-0.227 64	1.155 080	0.004 02	1.200 00
Q_{G2}	0.299 99	0.272 625	0.000 00	0.300 00
S	2.505 10	3.328 880	2.505 10	3.578 72
Q_{C3}	0.259 836		0.563 40	
Q_{C6}	0.451 800		0.072 00	
Q_{C8}	0.176 300		0.422 80	
T_{5-6}	1.036 560		0.900 00	
T_{4-7}	1.029 130		1.094 67	
T_{4-9}	0.914 450		0.900 00	
迭代次数	13		15	

注:表中 S 为负荷视在功率之和,以下同。

表 4 IEEE 14 节点系统各节点电压的最优值
Table 4 Bus voltage after optimization in IEEE 14-bus system

变量	$M_{\text{vsm}}^{\text{spec}}=0.2$		$M_{\text{vsm}}^{\text{spec}}=0.3$	
	正常工作点	临界工作点	正常工作点	临界工作点
V_1	1.050 00	1.023 80	1.018 46	1.049 70
V_2	1.035 14	0.946 14	0.993 82	0.973 69
V_3	1.004 96	0.866 40	1.009 41	0.916 19
V_4	1.013 94	0.875 46	0.979 57	0.901 09
V_5	1.022 69	0.890 61	0.975 19	0.902 73
V_6	1.050 00	0.852 36	1.050 00	0.890 03
V_7	1.020 36	0.890 57	0.979 06	0.912 65
V_8	1.049 93	0.924 17	1.050 00	0.988 04
V_9	1.039 07	0.786 88	1.029 78	0.822 83
V_{10}	1.032 95	0.783 51	1.025 15	0.819 88
V_{11}	1.037 29	0.808 96	1.033 21	0.846 71
V_{12}	1.036 72	0.825 01	1.036 16	0.863 81
V_{13}	1.029 97	0.810 33	1.028 54	0.847 44
V_{14}	1.016 55	0.763 71	1.010 52	0.799 27

4.2 IEEE 118 节点系统的计算结果

分别在节点 19,20,21,33,34,35,36,37,43 和 76 安装并联电容器,节点 69 处的发电机为平衡机。其中,各节点电压幅值的变化范围为 0.9~1.1,并

联电容器容量的上限为 0.9。

由于 IEEE 118 节点系统结构复杂,为便于比 较,选择稳定裕度分别为 0.15 和 0.3 来比较分析, 表 5 列出了当允许的 $M_{\text{vsm}}^{\text{spec}}$ 分别为 0.15 和 0.3 时, IEEE 118 节点系统发电机有功出力总和、无功出力 总和、负荷视在功率总和、并联电容器容量最优值及 迭代次数。当稳定裕度为 0.15 和 0.3 时,并联电容 器容量总和分别为 2.548 4 和 5.492 4,在临界运行 状态下发电机无功出力 和 并 联 电 容 器 容 量 之 和 分 别 为 18.509 4 和 19.870 0,随着稳定裕度的增大而增 加。通过比较可见,在节点 33,34,76 处,无功设备 容量的增幅较大,这是由于这些节点处及其附近的 负荷较重。当稳定裕度为 0.15 时,系统最低电压所 在的节点为 106,其值为 1.001 1,当稳定裕度为 0.3 时,节点 106 的电压升高到 1.010 5;当稳定裕度为 0.3 时,系统最低电压所在的节点为 1,节点 1 的电 压幅值从稳定裕度为 0.15 时的 0.950 0 升高到 1.000 8。

表 5 IEEE 118 节点系统发电机有功出力总和、无功出力总 和、负荷视在功率总和、并联电容器容量最优值及迭代次数

Table 4 Total active power and reactive power of generators,total apparent power of loads,capacity of shunt capacitor banks and number of iterations after optimization in IEEE 118-bus system

变量	$M_{\text{vsm}}^{\text{spec}}=0.15$		$M_{\text{vsm}}^{\text{spec}}=0.3$	
	正常工作点	临界工作点	正常工作点	临界工作点
$\sum_{i=1}^m P_{Gi}$	37.880 70	46.166 5	37.992 30	49.170 9
$\sum_{i=1}^m Q_{Gi}$	9.505 23	15.961 0	7.713 35	14.377 6
S	26.578 30	34.966 0	26.578 30	37.969 0
Q_{C19}	0.622 76		0.900 00	
Q_{C20}	0.020 83		0.207 65	
Q_{C21}	0.139 39		0.362 63	
Q_{C33}	0.136 06		0.480 77	
Q_{C34}	0.027 83		0.900 00	
Q_{C35}	0.097 68		0.335 94	
Q_{C36}	0.049 34		0.203 72	
Q_{C37}	0.899 99		0.900 00	
Q_{C43}	0.050 77		0.301 75	
Q_{C76}	0.503 72		0.900 00	
迭代次数	23		34	

5 结语

在进行无功规划时,有必要考虑电压稳定性约 束,并留有一定的裕度。预定的稳定裕度越大,无功 补偿设备容量需求也越大。当然,对于实际电力系 统,无功设备的安装地点还必须考虑实际情况。

本文通过直接把电压稳定约束加入到传统的无 功优化模型中,得到了计及电压稳定约束的无功优

化模型。该模型相对传统模型,其等式和不等式约束及变量的数目都有大幅增加,从而整个计算量远大于传统的无功规划问题。并且采用非线性原对偶内点法求解该模型时,其计算精度及收敛性都比较好。然而,将计及电压稳定裕度约束的无功优化问题完整且精确地描述为一个非线性混合整数规划模型,并探讨其求解方法,仍有待进一步研究。

参考文献

- [1] 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. *IEEE Trans on Power Systems*, 1999, 14 (1): 65—74.
- [2] 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. *IEEE Trans on Power Systems*, 2000, 15(2): 844—851.
- [3] 王勤,方鹤飞.考虑电压稳定性的电力系统多目标无功优化. *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. *Automation of Electric Power Systems*, 1999, 23(3): 31—34.
- [4] ROSEHART W D, CANIZARES C A, QUINTANA V H. Optimal Power Flow Incorporating Voltage Collapse Constraints. In: *Proceeding of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. Edmonton (Canada): 1999. 820—825.
- [5] 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. *IEEE Trans on Power Systems*, 2003, 18(1): 27—35.
- [6] ROSEHART W D, CANIZARES C A, QUINTANA V H.

- Multiobjective Optimal Power Flows to Evaluate Voltage Security Costs in Power Networks*. *IEEE Trans on Power Systems*, 2003, 18(2): 578—587.
- [7] OBADINA O O, BERG G J. VAR Planning for Power System Security. *IEEE Trans on Power Systems*, 1989, 4(2): 677—686.
- [8] CHATTOPADHYAY D, CHAKRABARTI B B. Reactive Power Planning Incorporating Voltage Stability. *Int J of Electrical Power & Energy Systems*, 2002, 24 (3): 185—200.
- [9] CHATTOPADHYAY D, CHAKRABARTI B B. Voltage Stability Constrained VAR Planning: Model Simplification Using Statistical Approximation. *Int J of Electrical Power & Energy Systems*, 2001, 23(5): 349—358.
- [10] 封向东,祖小涛,刘俊勇,等.电力系统无功优化和电压调控方案的研究. *成都科技大学学报*, 1995, 84(3): 86—92.
FENG Xiang-dong, ZU Xiao-tao, LIU Jun-yong et al. Optimization of Reactive Power and Schemes of Voltage Control in Electric Power Systems. *Journal of Chengdu University of Science and Technology*, 1995, 84(3): 86—92.
- [11] JANSEN B. *Interior Point Techniques in Optimization*. Dordrecht (The Netherlands): Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [12] 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. *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. *Automation of Electric Power Systems*, 2002, 26(1): 22—26.

刘明波(1964—),男,教授,博士生导师,副院长,主要研究方向为电力系统优化计算与稳定性分析及电力市场。
E-mail: epmbliu@scut.edu.cn

杨 勇(1979—),男,硕士,主要研究方向为电力系统无功优化计算与电压稳定分析。

Optimal Reactive Power Planning Incorporating Steady State Voltage Stability Constraints

LIU Ming-bo¹, YANG Yong²

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2. Foshan Branch, Guang-dian Power Grid Group Co Ltd, Foshan 528000, China)

Abstract: The cost that integrates investment of reactive equipments with active-power loss of electric power network is selected as objective function. The two sets of constraints concerning voltage profile and voltage stability are simultaneously considered to investigate reactive-power planning problem. A voltage stability margin that is not lower than a certain minimum permissible stability margin is chosen to express the voltage stability constraint. Two groups of variables and power-flow equations are introduced respectively for the normal state and the critical state so that the voltage stability margin can be represented explicitly by the difference between total apparent power of load in the critical state and that in the normal state. Compared with conventional reactive power planning model, this model can obtain optimal reactive power configuration scheme directly under a suitable voltage profile according to a target value of the stability margin. However, the number of equality and inequality constraints and variables increases obviously, which makes computational efforts greater than that in the conventional reactive power planning model. Results on IEEE 14-bus and IEEE 118-bus test systems show that nonlinear primal-dual interior-point method can be used for solving this model with satisfactory precision and convergence.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50277013) and Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 011648).

Key words: reactive power planning; voltage stability margin; nonlinear interior-point method