መ

计及分区动态无功储备的无功电压控制模型与方法

赵晋泉1,居俐洁1,罗卫华2,赵 军2

(1. 河海大学 教育部可再生能源发电技术研究中心,江苏 南京 210098;

2. 国网辽宁省电力有限公司调度控制中心,辽宁 沈阳 110006)

摘要:当前电网无功电压自动控制算法未能很好地提高系统电压稳定性。以电压控制分区动态无功储备作 为系统电压稳定性的量度,提出一种无功电压控制优化模型。通过计算各分区关键节点的电压--无功曲线得 到无功源的有效无功储备,以故障下无功源出力的最大变化量作为各分区最小无功储备,将分区动态无功储 备作为目标函数和约束条件加入优化模型中,以达到在保证电压稳定裕度的同时减少系统有功网损和实现电 压控制的目的。IEEE 118 节点系统的仿真结果和在某实际电网自动电压控制系统中的应用表明,所提出的 模型与方法是有效的。

关键词:无功电压控制; 电压控制; 电压稳定; 稳定性; 无功电压控制分区; 无功储备; 模型

中图分类号: TM 732 文献标识码: A

0 引言

电力系统无功电压自动控制可有效改善电压质 量,减少系统有功损耗,对电力系统的经济安全运行 有重要意义。但是传统优化模型中仅通过将节点电 压限制在合格范围内可能会导致系统无功储备的降 低,从而造成电压稳定性下降。随着电力市场的发 展以及负荷的加重,电压稳定问题日益突出,近年来 计及电压稳定性的电力系统无功电压控制研究成为 热点^[1-12]。

目前在考虑电压稳定性的无功电压优化中描述 电压稳定程度的方法大致有3种。第1种为状态指 标法。文献[2-4]将雅可比矩阵的最小奇异值作为衡 量电压稳定性的指标,建立了多目标无功电压控制 优化模型。文献[5-7]以L指标作为优化目标以提高 系统的电压稳定性。采用状态指标评估系统电压稳 定程度具有实现简便、计算快速的特点,但由于状态 指标线性性不好,无法计及发电机无功约束等非线 性因素。第2种为负荷裕度指标法。文献[8-10]在 优化模型中引入负荷裕度指标以实现在无功电压控 制的同时保证电压稳定裕度的目的。负荷裕度指标 在电压稳定评估中被广泛使用,可直观表征电压稳 定程度,但是预定义的负荷增长模式可能与实际情 况相差较大,且所需计算量较大。第3种为动态无功 储备指标法。文献[11-12]以动态无功储备作为电压

收稿日期:2014-07-17;修回日期:2015-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51077042);国家高技 术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05112);高等学 校博士学科点专项科研基金资助项目(20120094110008)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077042), the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05112) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(20120094110008) 稳定性的量度加入目标函数中,提出了一种多目标 无功电压控制优化模型。动态无功储备可有效反映 系统的电压稳定程度,具有直观、计算简便的优点。

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.05.016

在计算系统动态无功储备时需计及不同无功源 对电压稳定的支撑作用,目前主要有2种处理方法。 第1种通过不同的权重系数表征各无功源的重要程 度,将无功源的无功储备进行加权求和得到系统总 动态无功储备。该方法的重点在于权重系数的计算。 文献[11]将系统分为若干分区,通过计算每个分区的 无功负荷裕度得到该分区各无功源的权重系数,但 该方法对同分区中的不同无功源采用相同的权重系 数并不合适。文献[12]通过无功源所属分区的有功 负荷裕度及其在分区中所处的电气位置确定该无功 源的加权系数。文献[13]则是基于无功电压灵敏度 矩阵得到各无功源的权重因子。但基于节点间电气 距离或无功电压灵敏度的权重系数无法考虑系统的 非线性特征。第2种先计算各无功源的有效无功储 备,再将其相加得到系统总动态无功储备。文献[14-15 \将故障情况下 PV 曲线鼻点无功源的无功出力与 当前无功出力的差值作为无功源的有效无功储备, 以监测该故障态的电压稳定程度。文献[16]则将 VQ 曲线鼻点各无功源的无功出力与当前无功出力相减 得到其有效无功储备。这类方法是以无功源实际能 输出的最大有效无功出力来反映该无功源对系统的 无功支撑能力,并通过计算系统的电压崩溃点来考 虑系统的非线性特征,可以得到准确的最大有效无 功出力。

此外,现有的计及动态无功储备的无功电压控 制模型均仅通过目标函数中的系统总无功储备项来 提高系统的电压稳定程度,但这样并不能确保电网 各个分区都具有保证其稳定性的最小无功备用容 量,本文通过增加每个分区最小无功备用容量约束 来解决这一问题。文中引入文献[16]中有效无功储 备的概念,并将分区动态无功储备同时作为目标函 数和约束条件,提出一种新的无功电压控制优化模 型。对 IEEE 118 节点系统的仿真结果和在辽宁电网 自动电压控制(AVC)系统中的实际应用表明,本文 所提出模型与方法是有效的。

计及分区动态无功储备的无功电压控制 优化模型

本文将分区动态无功储备同时引入目标函数和 约束条件中,建立了如下无功电压控制优化模型。 1.1 目标函数

$$\min \omega_1 \frac{P_{\text{loss}}}{f_1^*} + \omega_2 \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{fl}}} (U_i - U_{i,\text{set}})^2}{f_2^*} - \omega_3 \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{cl}}} (Q_{\text{g},j,\text{eff}} - Q_{\text{g},j})}{f_3^*}$$
(1)

其中, $N_{\rm B}$ 和 $N_{\rm C}$ 分别为系统中节点和无功源的个数; ω_1, ω_2 和 ω_3 为各优化目标的权重系数,其取值可根据 实际优化需求进行调整,且有 $\omega_1+\omega_2+\omega_3=1$; $P_{\rm loss}$ 为 系统有功网损; U_i 和 $U_{i,set}$ 分别为节点 i的电压及其 期望值; $Q_{g,i}$ 和 $Q_{g,i,eff}$ 分别为无功源 i的无功出力和 最大有效无功出力; $f_1^* f_2^* 和 f_3^*$ 分别为 3 个子目标函 数的最优值,即单独考虑某一子目标最优时的目标 值。目标函数中,第 2 项为电压偏移量,第 3 项为系 统总动态无功储备。

1.2 约束条件

a. 潮流方程约束:

$$g(\boldsymbol{x}) = 0 \tag{2}$$

b. 运行约束:

$$U_{i,\min} \leqslant U_i \leqslant U_{i,\max} \quad i=1,2,\cdots,N_{\rm B} \tag{3}$$

c. 控制受重上、 ▷ 限约果:

$$Q_{g,i,\min} \leq Q_{g,i} \leq Q_{g,i,\max} \quad i=1,2,\cdots,N_G$$

$$T \leq T \leq T \quad i=1,2,\cdots,N_G$$

$$(4)$$

$$T_{i,\min} \leq T_i \leq T_{i,\max} \quad i=1,2,\cdots,N_{\mathrm{T}} \tag{5}$$

$$Q_{C,i,\min} \leq Q_{C,i} \leq Q_{C,i,\max} \quad i=1,2,\cdots,N_C \tag{6}$$

d. 分区动态无功储备约束:

$$\sum_{j=1}^{N_{\rm c,k}} (Q_{{\rm g},j,{\rm eff}} - Q_{{\rm g},j}) \ge Q_{{\rm rs},k,{\rm min}} \quad k=1,2,\cdots,N_{\rm area}$$
(7)

其中, x 为系统状态变量向量; g(x) 为潮流平衡方程; $N_{\rm T}$ 和 N_c 分别为系统中变压器可调变比和并联电容 电抗的个数; $U_{i,\max}$ 和 $U_{i,\min}$ 分别为节点 i 电压的上、下 限; $Q_{g,i,\max}$ 和 $Q_{g,i,\min}$ 分别为无功源 i 的无功出力上、下 限; T_i 、 $T_{i,\max}$ 和 $T_{i,\min}$ 分别为变压器 i 的变比及其上、下 限; $Q_{c,i}$ 、 $Q_{c,i,\max}$ 和 $Q_{c,i,\min}$ 分别为电容电抗 i 的补偿值 及其上、下限; $N_{\rm area}$ 为电网分区个数; $N_{\rm G,k}$ 为分区 k 中 无功源节点个数; $Q_{\rm rs,k,\min}$ 为分区 k 的动态无功储备 下限值。 上述模型的特点为:引入有效无功储备的概念, 通过各无功源有效无功储备的直接相加得到系统动 态无功储备;将动态无功储备同时作为目标函数和 约束条件加入优化模型中,以达到在提高系统总动 态无功储备的同时确保各分区动态无功储备的均 衡,避免局部电压崩溃的发生。

本文无功电压控制优化模型的重点和难点在于 无功源有效无功储备和各分区动态无功储备下限值 的计算。

2 分区动态无功储备的计算

2.1 有效无功储备的定义

电力系统无功储备可分为静态和动态2种。由 并联电容器等提供的静态无功储备不具有恒定电压 支持能力,无法有效响应故障。本文的无功储备主要 是发电机、调相机和 STATCOM 等动态无功源提供 的无功储备。动态无功储备对维持系统电压稳定性 具有重要作用。当动态无功储备充足时,可以应对各 种故障或负荷快速增长,维持系统的电压稳定。因 此,动态无功储备水平可作为一种衡量系统电压稳 定程度的指标^[17]。

在实际电力系统运行中,由于电网拓扑和负荷状态等因素,动态无功源的最大无功输出并不一定等于 其技术上的无功上限。有些无功源的无功出力还未 增长至其技术无功上限,电网就已电压崩溃^[1416]。因 此,本文将系统电压崩溃点各动态无功源的无功出 力作为其最大有效无功出力,其与当前无功出力的 差值即为其有效无功储备。

2.2 基于 VO 曲线法的分区动态无功储备计算

由于无功的局部平衡特性,在无功电压控制中 对电网进行分区是一种十分有效的手段。文中采用 文献[18]提出的分区方法将电网分为 N_{area} 个分区, 并采用 VQ 曲线法计算各分区动态无功源的最大有 效无功出力。实现 VQ 曲线法首先要确定各分区的 关键节点,分区过程中得到的电气距离 d_{ij} 可作为识 别分区关键节点的依据。

$$d_{ij} = -\lg \left| \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} \right| = -\lg \left| \frac{\Delta U_j}{\Delta Q_i} \left(\frac{\Delta U_i}{\Delta Q_i} \right)^{-1} \right|$$
(8)

其中, d_{ij} 为无功源节点 i 对被控节点 j 的电气距离; ΔU_i 为节点 i 的电压偏移量; ΔQ_i 为节点 i 的无功注 入变化量。

将式(8)代入式(9)计算被控节点到该分区中各 无功源的综合平均电气距离,选择其中距离最小的节 点作为该分区的关键节点。这样得到的关键节点为 分区的电气中心,其与各无功源的电气距离均适中, 可以全面地考虑整个分区无功源的无功出力情况。

$$\overline{D}_{j} = \sqrt{\sum_{i \in G_{k}} d_{ij}^{2}}$$
(9)

其中, \overline{D}_j 为节点j到其所属分区k中各无功源的综 合平均电气距离; G_k 为分区k中无功源的集合。

VQ 曲线法^[19]的具体做法是:在分区关键节点上 投入一台虚拟的调相机,逐步减小调相机的输出电 压 U_f,求解潮流得到该调相机的无功输出 Q_f,重复此 步骤直至采集到足够多的点,便可得到该节点的 VQ 曲线,如图 1 所示。VQ 曲线的最低点 A 为电压崩溃 点,此时各无功源的输出即为其最大有效无功出力。



图 1 VQ 曲线 Fig.1 VQ curve

将由 VQ 曲线法得到的无功源最大有效无功出 力代入式(10),即可得到各分区的动态无功储备。

 $Q_{\rm rs,k} = \sum_{j=1}^{N_{\rm c,k}} (Q_{\rm g,j,eff} - Q_{\rm g,j}) \quad k = 1, 2, \cdots, N_{\rm area}$ (10)

其中,Q_{is,k}为分区 k 的动态无功储备。

相比于文献[11-13]中利用各无功源技术无功 储备加权求和得到系统总动态无功储备的方法,本 文做法不仅避免了上述权重因子求取的不确定性, 而且有效计及了各无功源对系统电压稳定的不同影 响,具有快速简便的优点。

2.3 分区最小无功储备限值的计算

为了避免局部电压崩溃现象的发生,各分区应 确保一定量的动态无功储备。由于各分区的结构和 负荷情况不同,其保证电压稳定性所需的最小无功 储备也不同。

在计算分区所需最小无功储备时,本文采用的 方法是选择分区中最严重的单一开断故障(本文以 负荷最重的一条线路故障为例),计算此时关键节点 VQ曲线,如图2虚线所示,得到VQ曲线鼻点A*各 无功源的无功出力 Q^{*}_{si,eff}和运行点B*各无功源的无



图 2 故障情况下的 VQ 曲线 Fig.2 VQ curves in fault condition

功出力 Q^{*}_{s,j},代入式(11)计算各分区所需的最小无功储备限值。

$$Q_{\text{rs},k,\min} = \sum_{j=1}^{N_{\text{c},i}} \left(Q_{\text{g},j,\text{eff}}^* - Q_{\text{g},j}^* \right) \quad k = 1, 2, \cdots, N_{\text{area}}$$
(11)

本文认为各分区正常运行状态下的动态无功储 备应大于该分区在故障情况下无功源输出可能出现 的最大变化量,以保证该分区有充足的无功储备维 持其电压稳定性。

3 算法步骤

本文提出的计及分区动态无功储备的无功电压 控制的实现步骤如下。

步骤1分区动态无功储备及其下限值的计算。

a. 确定电网的无功电压控制分区;

b. 确定各分区的关键节点;

c. 计算各分区关键节点 VQ 曲线的鼻点,得到 无功源的最大有效无功出力;

d. 根据式(10)计算分区动态无功储备;

e. 确定各分区最严重故障;

f. 计算该故障下的 VQ 曲线,根据式(11)计算 各分区所需的最小无功储备限值。

步骤 2 建立式(1)—(7)的数学模型,并应用考 虑离散变量的非线性原对偶内点法^[20]进行求解。

4 算例分析

为了验证本文无功电压控制优化模型与方法的 有效性,对 IEEE 118 节点系统进行仿真并将其应用 于辽宁电网自动电压控制系统中。

4.1 IEEE 118 节点系统

利用前文所述的分区算法对系统进行分区,将 IEEE 118 节点系统分为 8 个分区并识别各分区的关 键节点,如表 1 所示。

计算各分区关键节点的 VQ 曲线,得到无功源 的最大有效无功出力。以 7 号分区为例,其关键节点 为节点 101,由表 2 可看出距离关键节点电气距离较 远的无功源的最大有效无功出力一般小于其技术无 功出力上限,其中无功源 103、104 和 105 虽然距离 关键节点电气距离也较远,但是由于自身无功输出 容量较小,其最大有效无功出力也达到了技术无功 出力上限。

建立式(1)—(7)的数学模型(本文取 ω_1 =0.53、 ω_2 =0.0005、 ω_3 =0.4695),采用非线性原对偶内点法进 行求解,并与传统无功电压控制和文献[12]优化方 法进行比较,如表3和表4所示(表3中电压偏移量 为标幺值,后同)。结果表明:传统无功电压控制主要 优化了系统的有功网损,系统总动态无功储备虽略 有增加,但这是某些分区无功储备的增加量大于其

分区号	点节	关键节点
1	2,3,5,7,9,11,13,14,16,28,29,30,117, 1*,4*,6*,8*,10*,12*,26*,27*,31*	16
2	$17,33,35,37,38,39,41,43,44,45,63,15^{\circ},\\18^{\circ},34^{\circ},36^{\circ},40^{\circ},42^{\circ},46^{\circ},59^{\circ},63^{\circ},113^{\circ}$	38
3	20,21,22,23,114,115,19*,24*,25*,32*	22
4	47,48,50,51,52,53,57,58,60,64,67, 49°,54°,55°,56°,61°,62°,66°	64
5	68,75,78,79,81,82,83,84,86,96,97,98, 118,69°,74°,76°,77°,80°,85°,87°,99°,116°	82
6	71,70*,72*,73*	71
7	88,93,94,95,101,102,106,108,89°, 90°,91°,92°,100°,103°,104°,105°,107°	101
8	$109,110^*,111^*,112^*$	109

表 1 IEEE 118 节点系统分区结果 Table 1 Partitions of IEEE 118-bus system

注:带"*"的节点代表无功源节点。

表 2 IEEE 118 节点系统分区 7 无功源最大有效无功出力

Table 2 Maximum effective output of reactive power source in partition 7 of IEEE 118-bus system

_		x		•
	分区 7 无功源 节点号	距离关键节点 的电气距离	无功源技术无功 出力上限/Mvar	无功源最大有效 无功出力/Mvar
	89	6.9489	300.00	132.63
	90	13.6714	300.00	59.58
	91	7.4705	100.00	28.47
	92	0.3660	50.00	50.00
	100	0.2424	155.00	155.00
	103	6.9626	40.00	40.00
	104	7.5520	33.00	33.00
	105	7.7882	30.00	30.00
	107	8.3126	200.00	22.45

表 3 IEEE 118 节点系统无功电压控制结果

Table 3 Results of reactive voltage control for IEEE 118-bus system

优化 目标	有功 网损/MW	电压 偏移量	系统总无功 储备/Mvar
优化前	132.60	0.0389	4090.44
传统优化模型	111.05	0.1923	4662.89
文献[12]优化模型	123.00	0.1463	5 5 4 2.15
本文优化模型	115.50	0.0510	5 524.85

表 4 IEEE 118 节点系统各分区无功储备优化结果	
Table 4 Results of reactive power reserve optimization	n
for different partitions of IEEE 118-bus system	

	-			•	
	优化前无	优化后无功储备/Mvar			分区所需
分区号	功储备/	传统	文献[12]	本文	最小无功
	Mvar	方法	方法	方法	储备/Mvar
1	456.81	948.68	976.99	952.77	381.86
2	670.25	734.63	1110.10	983.63	749.63
3	305.04	125.66	75.90	270.59	231.26
4	986.60	788.28	1042.48	1073.73	964.29
5	671.14	931.88	1028.11	943.51	679.42
6	224.37	223.50	184.39	249.03	210.89
7	368.93	474.93	662.53	555.02	362.14
8	407.30	435.32	461.64	496.57	29.77

余分区无功储备减小量导致的结果;文献[12]优化 方法将加权无功储备作为目标函数之一,该方法虽 较大幅度地提高了系统的总动态无功储备,但分区 3 和分区 6 无功储备有所减少,存在无功储备分布不 均的现象;本文提出的无功电压控制方法可通过选 取合适的权重系数达到在牺牲较少有功网损优化效 果的前提下,减少电压偏移量和增加系统总动态无 功储备的目的,并通过约束条件确保各分区的动态 无功储备均大于其所需的最小值,使系统动态无功 储备分布更为均衡。

为了进一步比较上述3种优化方法对系统电压 稳定性的影响,本文分别采用分区负荷增加和全网 负荷增加的方式,使各节点负荷按原始比例增长,以 各分区关键节点为电压观测点,计算得到优化前后 各分区及全系统的有功负荷裕度,如表5所示。表5 中的结果表明:传统无功电压控制和文献[12]优化 方法虽然使系统整体的电压稳定性增加了,但由于 各分区动态无功储备分布不均导致部分分区的电压 稳定性有所降低,而本文无功电压控制通过将无功 储备引入目标函数和约束条件中,实现了在维持各 分区电压稳定的前提下,提高系统整体电压稳定性 的目的。

表 5 IEEE 118 节点系统优化前后有功负荷裕度比较 Table 5 Comparison of active power load margin between

before and after optimization of IEEE 118-bus system

分区	当前有功	优化前负荷	优化后负荷裕度/MW		
号	负荷/MW	裕度/MW	传统方法	文献[12]方法	本文方法
1	567.00	833.26	926.93	937.31	930.24
2	820.00	1278.63	1 280.43	1315.77	1313.07
3	183.00	847.51	838.84	827.03	846.45
4	722.00	1151.81	1 1 4 0.54	1211.38	1217.58
5	734.00	1086.54	1 204.42	1228.13	1 209.85
6	66.00	635.48	635.22	622.24	659.45
7	504.00	675.46	712.45	782.41	776.61
8	72.00	289.26	289.78	313.90	320.41
总计	3668.00	2240.41	2358.16	2387.50	2385.30

4.2 辽宁电网实际应用

本文所提出的无功电压控制方法已成功应用于 辽宁电网自动电压控制系统中。本算例所用数据是 辽宁电网 2013 年 10 月 22 日的实时数据。

首先对辽宁电网进行无功电压控制分区,结果 如表6所示。

按照前文所述实现步骤,建立计及分区动态无 功储备的无功电压控制数学模型(本文取 ω_1 =0.28、 ω_2 =0.07、 ω_3 =0.65),得到优化结果如表 7 和表 8 所 示。由表 7、8 可以看出:传统无功电压控制在实际 电网中同样会导致系统动态无功储备分布不均,而本 文提出的无功电压控制方法可以根据不同分区对无 功储备的需求程度均衡各分区无功源的无功出力,保 证各分区具备其所需的最小无功储备量,并在此基础 上减少有功网损、改善电压质量、提高系统的整体电 压稳定性。

表 6 辽宁电网的分区结果

Table 6 Partitions of Liaoning Power Grid

分区与	寻 节点
1	鞍山厂,调兵山厂,红阳热厂,苏家屯热厂, 沈西热厂,红山风电场,康平朝阳堡风电场, 昌图太平风电场,彰北风电场
2	鞍钢三厂,红沿河厂,营口厂,营口热厂, 驼山风电场,海派风电场
3	阜新厂,金山火厂,锦州热厂,南票厂,燕山湖厂, 阜新风电场,阜西风电场,华能老龙口风电场, 凌海风电场,扎兰山风电场,协合万家风电场, 锦州迎东风电场,锦州千军风电场
4	回龙水厂,双岭水厂,太平哨水厂,长甸厂,丹东厂, 丹东热厂,抚顺热厂,能港厂,太平湾厂,顺化厂
5	大连湾火厂,大开火厂,甘井子火厂, 泰山火厂,庄河火厂
6	康平厂,清河厂,沈海厂,铁岭厂

注:仅列出电厂节点的分区情况。

表 7 辽宁电网无功电压控制结果

Table 7 Results of reactive voltage control for Liaoning Power Grid

优化	有功	电压	系统总有效
目标	网损/MW	偏移量	无功储备/Mvar
优化前	221.74	0.7934	1788.06
传统优化模型	207.93	1.3520	2594.57
本文优化模型	208.55	1.2987	2628.91

表 8 辽宁电网各分区无功储备优化结果

Table 8 Results of reactive power reserve optimization for different partitions of Liaoning Power Grid

分区	优化前相对 优化前天		优化后无功	分区所需	
号	有切贝何 裕度/Mvar	功怕奋/ Mvar	传统方法	本文方法	- 取小儿切 储备/Mvar
1	2.0488	442.14	515.37	439.71	439.71
2	1.3329	98.63	133.18	98.24	98.24
3	0.4417	462.68	1031.54	1014.08	460.89
4	0.9832	223.78	220.34	374.89	222.69
5	1.0569	259.50	371.56	402.03	256.73
6	1.7261	301.33	322.58	299.96	299.96

5 结论

本文以动态无功储备作为系统电压稳定性的量度,将分区动态无功储备同时作为目标函数和约束条件,提出了计及分区动态无功储备的无功电压控制模型与方法,该方法可以实现减小电网有功损耗、改善电压质量和提高电压稳定性的目标。IEEE 118 节点系统和辽宁省实际电网的仿真结果表明,本文方 法可以有效克服现有无功电压控制导致系统无功储 备分布不均的缺陷,实现均衡各分区动态无功储备、 提高系统电压稳定性的目的,具有实际应用意义。

参考文献:

- [1] 刘明波,谢敏,赵维兴.大电网最优潮流计算[M].北京:科学出版社,2010:271-303.
- [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[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2000,15(2):844-851.

- [3] 刘述奎,李奇,陈维荣,等.改进粒子群优化算法在电力系统多目标无功优化中应用[J].电力自动化设备,2009,29(11):31-36.
 LIU Shukui,LI Qi,CHEN Weirong, et al. Multi-objective reactive power optimization based on modified particle swarm optimization algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009,29 (11):31-36.
- [4] 罗毅,多靖赟. 基于量子免疫克隆算法的多目标无功优化[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):31-35.
 LUO Yi,DUO Jingyun. Multi-objective reactive power optimization based on quantum immune colonial algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9):31-35.
- [5] NAKAWIRO W,ERLICH I. A combined GA-ANN strategy for solving optimal power flow with voltage security constraint[C]// Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China: IEEE, 2009:1-4.
- [6] VAISAKH K, SRIDHAR M, MURTHY K S L. Adaptive PSO-DV algorithm for minimization of power loss and voltage instability [C]//2009 International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies. Trivandrum, Kerala: IEEE, 2009:140-144.
- [7] 邱威,张建华,刘念. 自适应多目标差分进化算法在计及电压稳定性的无功优化中的应用[J]. 电网技术,2011,35(8):81-87.
 QIU Wei,ZHANG Jianhua,LIU Nian. A self-adaptive multiobjective differential evolution algorithm for reactive power optimization considering voltage stability[J]. Power System Technology,2011,35(8):81-87.
- [8] 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 Mingbo,YANG Yong. Optimal reactive power planning incorporating steady state voltage stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(5):21-25.
- [9] LIU X L,LI J W,LI H M,et al. Fuzzy modeling and interior point algorithm of multi-objective OPF with voltage security margin[C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Dalian, China; IEEE, 2005:1-6.
- [10] 张安安,杨洪耕,贺星棋,等.考虑负荷变化影响的综合无功优 化并行计算模型[J].电力系统保护与控制,2010,38(18):13-18.
 ZHANG Anan,YANG Honggeng,HE Xingqi,et al. Parallel computing model for coordinated reactive power optimization considering load changing[J]. Power System Protection and Control,2010,38(18):13-18.
- [11] DONG F,CHOWDHURY B H,CROW M L,et al. Improving voltage stability by reactive power reserve management [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2005,20(1):338-345.
- [12] 熊虎岗. 计及静态电压稳定性的多目标无功潮流优化[D]. 上海:上海交通大学,2008.
 XIONG Hugang. Multi-objective optimal reactive power flow considering static voltage stability[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2008.
- [13] CHOI Y H,SEO S,KANG S,et al. Justification of effective reactive power reserves with respect to a particular bus using linear sensitivity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011,26(4):2118-2124.
- [14] CAPITANESCU F, CUTSEM T V. Evaluation of reactive power reserves with respect to contingencies [C]//Bulk Power System Dynamics and Control V. Onomichi, Japan: IEEE, 2001:1-9.

104

- [15] SONG H, LEE B, KWON S H, et al. Reactive Reserved-based Contingency Constrained Optimal Power Flow (RCCOPF) for enhancement of voltage stability margins [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4):1538-1546.
- [16] MOUSAVI O A, BOZORG M, AHMADI-KHATIR A, et al. Reactive power reserve management: preventive countermeasure for improving voltage stability margin[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2012:1-7.
- [17] 吴浩,郭瑞鹏,甘德强,等. 发电机有效无功储备的分析和计算
 [J]. 电力系统自动化,2011,35(15):13-17.
 WU Hao,GUO Ruipeng,GAN Deqiang,et al. Analysis and computation of effective reactive power reserve of generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(15):13-17.
- [18] 赵晋泉,刘傅成,邓勇,等. 基于映射分区的无功电压控制分区 算法[J]. 电力系统自动化,2010,34(7):36-39.
 ZHAO Jinquan,LIU Fucheng,DENG Yong, et al. Network partitioning for reactive power/voltage control based on a mapping division algorithm[J]. Automation of Electric Power
- [19] CHOWDHURY B H, TAYLOR C W. Voltage stability analysis: V-Q power flow simulation versus dynamic simulation [J]. IEEE

Systems, 2010, 34(7): 36-39.

Transactions on Power Systems, 2000, 15(4):1354-1359.

[20] 程莹,刘明波. 求解离散无功优化的非线性原--对偶内点法[J]. 电力系统自动化,2001,25(9):23-27.

CHENG Ying, LIU Mingbo. Nonlinear primal-dual interior point algorithm for discrete reactive power optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(9):23-27.

作者简介:



赵晋泉(1972—),男,山西阳泉人,教 授,博士,主要从事电力系统优化运行、电压 稳定分析与控制和电力市场等方面的研究 工作(**E-mail**:jgzhao2@tom.com);

居俐洁(1989—),女,江苏苏州人,硕 士研究生,主要研究方向为电力系统优化 运行:

赵晋泉

罗卫华(1977—),男,湖北仙桃人,高级 工程师,博士,从事电网调控自动化、新能源并网方面的研究; 赵 军(1973—),男,辽宁沈阳人,高级工程师,从事电网

调控自动化方面的研究。

Reactive voltage control model and method considering partitioned dynamic reactive power reserve

ZHAO Jinquan¹, JU Lijie¹, LUO Weihua², ZHAO Jun²

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University,

Nanjing 210098, China; 2. State Grid Liaoning Electric Power Dispatching Control Center, Shenyang 110006, China)

Abstract: Since the existing algorithms of automatic reactive voltage control cannot effectively improve system voltage stability, an optimal reactive voltage control model with the dynamic reactive power reserve of voltage control partition as the measurement of system voltage stability is built. The effective reactive power reserve is obtained by calculating the voltage-reactive power curve of key nodes for each partition, the maximum variation of reactive power output in fault condition is taken as the minimum reactive power reserve for each area, and the partitioned dynamic reactive power reserve is introduced into the optimal model as its objective function and constraint to ensure the voltage stability margin, lower the system active power loss and control the voltage. The simulative results of IEEE 118-bus system and the application in an automatic voltage control system of a real grid show that, the proposed model and method are effective.

Key words: reactive voltage control; voltage control; voltage stability; stability; reactive voltage control partition; reactive power reserve; models