

文章编号: 1000-582X(2012)07-061-06

## 考虑薄弱支路功率约束的静态电压稳定预防控制

颜 伟<sup>1</sup>, 户秀琼<sup>1</sup>, 余 娟<sup>1</sup>, 李文沅<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. BC Hydro 公司, 温哥华 V7X 1V5, 加拿大)

**摘 要:** 考虑到系统的静态电压不稳定往往是由局部薄弱支路的传输功率超过其功率传送能力所引起, 提出了将薄弱支路有功功率约束作为静态电压稳定约束的预防控制模型。该模型首先采用局部性电压稳定指标, 确定出关键预想故障、薄弱支路及其功率传送能力; 而后结合基于直流潮流模型的静态安全分析方法, 给出薄弱支路在关键预想故障下的有功功率非线性表达式, 从而得到关键预想故障下的薄弱支路有功功率约束; 最后, 建立了包含该约束的全二次预防控制优化模型。IEEE14 节点系统与 IEEE118 节点系统的仿真结果验证了笔者所提预防控制模型的正确性和有效性。

**关键词:** 电力系统; 电压控制; 预防控制; 静态电压稳定; 局部性电压稳定指标; 全二次优化模型

**中图分类号:** TM 732

**文献标志码:** A

### A preventive control model for static voltage stability considering the power constraints of weak branches

YAN Wei<sup>1</sup>, HU Xiuqiong<sup>1</sup>, YU Juan<sup>1</sup>, LI Wenyuan<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. BC Hydro Company, Vancouver V7X 1V5, Canada)

**Abstract:** The voltage instability of power system often occurs when the active power on one or more weak branches exceeds its transfer capability. A preventive control model for static voltage stability is proposed using the active power transfer capability of weak branches as static voltage stability constraints. A local line-based voltage stability index is used to determine the critical contingencies, weak branches and transfer capability of each weak branch. A static security analysis method, which is based on DC power flow equations, is used to establish the non-linear active power flow expressions on weak branches following each critical contingency. The active power constraints on weak branches can be obtained from the active power flow expressions and transfer capabilities of weak branches. A quadratic optimal model for preventive control including the proposed active power constraints on weak branches is presented. The simulation results for IEEE14-bus system and IEEE118-bus system demonstrate the correctness and effectiveness of the proposed preventive control model.

**Key words:** electric power system; voltage control; preventive control; static voltage stability; local voltage stability index; quadratic optimal model

**收稿日期:** 2012-02-03

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51007098); 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究课题(2007DA10512710201)

**作者简介:** 颜伟(1968-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事电力系统优化运行与控制方面的研究, (E-mail) cquyanwei@163.com。

近年来,电压失稳事故在全世界的不同电力系统均有发生,造成了巨大的经济损失。因此,电压稳定问题成为了国内外工程界和学术界极为关注的热点之一。电压稳定分为动态/暂态电压稳定和静态电压稳定。针对静态电压稳定问题的分析与评估方法已经取得了重要的成果。然而,如何采用更为有效的预防控制措施,保证系统在正常运行状态和预想故障下的静态电压稳定性,还需要做更进一步的研究。

现有基于静态电压稳定的预防控制问题大多以考虑静态电压稳定约束的优化模型来描述<sup>[1-10]</sup>。文献[1-7]根据静态电压稳定指标对控制量的灵敏度信息,将静态电压稳定约束以线性灵敏度形式来表示,由此建立了线性化的预防控制优化模型。但电力系统是一个非线性系统,特别是当其濒临或者发生静态电压失稳时,系统的非线性特点更为突出,因此,线性化的预防控制优化模型存在一定的局限性<sup>[8]</sup>。文献[9-10]则将静态电压稳定约束以正常运行状态和预想故障下的参数化潮流等式约束来表示,并建立了能完全反映电力系统非线性特点的预防控制优化模型。但是,当系统本身规模较大时,该预防控制所包含的预想故障集合规模也较大,即使此时采取确定关键预想故障集的策略来简化预防控制模型的规模,但模型中所包含的这种非线性潮流等式约束的数目还是很可观的,从而使得预防控制模型的求解存在一定的难度。

实际上,电力系统的静态电压稳定问题往往是由一条或几条薄弱支路传输的功率超过其功率传送能力所引起。如果仅仅针对少数薄弱支路的功率约束来建立相应的静态电压稳定约束以及非线性预防控制模型,则不但可以保持电力系统的非线性特点,还能简化预防控制模型的规模,降低其求解难度。

由于在实际电力系统中,支路上传输的功率一般以有功功率占主导地位,因此目前不管是在理论研究,还是在实际工程应用,支路的功率传送能力均广泛采用有功功率来表示<sup>[11-12]</sup>。

鉴于此,笔者采用文献[13]提出的局部性电压稳定指标——扩展线路电压稳定指标(extended line stability index, ELSI)确定出系统在预想故障下的薄弱支路及其有功功率传送能力,同时得到关键预想故障;而后采用计算速度较快且具有足够精度的基于直流潮流模型的静态安全分析方法,表示出关键预想故障下的薄弱支路有功功率,以此建立起以薄弱支路有功功率约束表示的预防控制静态电压稳定约束,以及具有非线性特点的全二次预防控制

优化模型,并采用预测-校正原对偶内点法求解。

## 1 静态电压稳定预防控制新模型

### 1.1 预防控制新模型的静态电压稳定约束

#### 1.1.1 关键预想故障、薄弱支路及其功率传送能力的确定

文献[13]指出系统要保持静态电压稳定,要求每条支路的 ELSI 必须大于或等于 1.0;支路的 ELSI 越接近 1.0,说明该支路就越薄弱,系统的静态电压稳定裕度越小。因此,为了保证系统在正常运行状态下以及预想故障下均具有一定的静态电压稳定裕度,需要对 ELSI 设定一个大于 1.0 的门槛值,定为  $\alpha$ 。这个  $\alpha$  值与 1.0 的差反映了系统的静态电压稳定裕度(即实际容许传送的最大有功功率与电压稳定崩溃点之间的裕度)要求,各个电力公司对于该裕度要求都有具体的规定。同时,为了便于说明问题,笔者将正常运行状态作为预想故障的一种特殊情况,且仅考虑  $N-1$  支路断开故障。

利用系统在预想故障下的潮流解,可以得到各条支路在各个预想故障下的 ELSI,并将其与门槛值  $\alpha$  进行比较。假设在  $kl$  支路断开的预想故障下,  $ij$  支路的 ELSI 小于  $\alpha$ ,则将  $ij$  支路确定为薄弱支路,并将  $kl$  支路断开确定为关键预想故障。而  $ij$  支路在  $kl$  支路断开下的有功功率传送能力则可以通过式(1)估算出来<sup>[13]</sup>。

$$P_{ij\_weakmax} = (ELSI_{ij\_weak} / \alpha) \times P_{ij\_weak}, \quad (1)$$

其中,  $P_{ij\_weakmax}$ 、 $P_{ij\_weak}$  和  $ELSI_{ij\_weak}$  分别为  $ij$  支路在  $kl$  支路断开下的有功功率传送能力、支路有功功率以及 ELSI。

#### 1.1.2 关键预想故障下的薄弱支路有功功率表达式

利用基于直流潮流模型的静态安全分析方法,可以将薄弱支路  $ij$  在  $kl$  支路断开下传输的有功功率采用式(2)表示出来<sup>[14]</sup>。

$$P_{ij1}(e, f) = P_{ij0}(e, f) + \rho_{ij}^{kl} P_{kl0}(e, f) \frac{X_{kl}}{X_{ij}}, \quad (2)$$

其中:  $X_{ij}$  与  $X_{kl}$  分别为支路  $ij$  与支路  $kl$  的电抗;  $e, f$  分别为当前正常运行状态下节点电压相量的实部和虚部;  $P_{ij0}(e, f)$  和  $P_{kl0}(e, f)$  分别为支路  $ij$  与支路  $kl$  在正常运行状态下传输的有功功率,在直角坐标系中是  $e, f$  的二次函数;  $P_{ij1}(e, f)$  为支路  $ij$  在关键预想故障下传输的有功功率;  $\rho_{ij}^{kl}$  为支路  $kl$  对支路  $ij$  的传递系数。正常运行状态下,传递系数  $\rho_{ij}^{kl}$  为零,此时,  $P_{ij1}(e, f)$  与  $P_{ij0}(e, f)$  的表示形式相同。在关键预想故障下,  $\rho_{ij}^{kl}$  的计算公式如式(3)所示<sup>[14]</sup>。

$$\rho_{ij}^{kl} = (\mathbf{S}^{ij})^T [\mathbf{B}'_0]^{-1} \mathbf{S}^{kl} / (X_{kl} - (\mathbf{S}^{kl})^T [\mathbf{B}'_0]^{-1} \mathbf{S}^{kl}), \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{S}$  为正常运行状态下的节点支路关联矩阵。当节点  $i$  为第  $b$  条支路的首节点时, 则  $\mathbf{S}$  的第  $i$  行、第  $b$  列元素为 1; 当节点  $j$  为第  $b$  条支路的末节点时, 则  $\mathbf{S}$  的第  $j$  行、第  $b$  列元素为 -1; 当节点  $k$  不与第  $b$  条支路相连时, 则  $\mathbf{S}$  的第  $k$  行、第  $b$  列元素为 0。  $\mathbf{S}^{kl}$  与  $\mathbf{S}^{ij}$  分别为  $kl$  支路和  $ij$  支路在  $\mathbf{S}$  中所对应的列。  $\mathbf{B}'_0$  为正常运行状态下网络的直流潮流电纳矩阵。

### 1.1.3 预防控制的静态电压稳定约束

由式(1)和式(2), 可建立关键预想故障下的薄弱支路有功功率约束, 如式(4)所示。

$$P_{ij0}(e, f) + \rho_{ij}^{kl} P_{kl0}(e, f) \frac{X_{kl}}{X_{ij}} \leq P_{ij\_weakmax}. \quad (4)$$

在任何复杂的输电系统中, 只要有一条支路的传输有功功率超过其传送能力, 系统就会有静态电压稳定问题产生。因此, 式(4)所体现的薄弱支路有功功率约束, 可以作为系统在关键预想故障下的静态电压稳定约束。而且, 在实际电力系统中, 引发系统静态电压稳定问题的薄弱支路数目往往较少。因此, 以式(4)来表示的薄弱支路有功功率约束的数目也较少, 从而可以简化预防控制模型的规模, 降低其求解难度。

## 1.2 全二次预防控制优化模型

利用式(4)所示关键预想故障下的静态电压稳定约束, 考虑正常运行状态下的网损及切负荷最小目标, 可以建立如式(5)-(17)所示的预防控制优化模型:

$$\min \quad \sum_{i \in N_B} P_{Gi} - \sum_{i \in N_B} (P_{Di} - C_i) + \sum_{i \in N_B} \omega_i C_i, \quad (5)$$

s. t.

$$P_{Gi} - (P_{Di} - C_i) - \sum_{ij \in S_{Li}} P_{Lij}(e, f) - \sum_{ij \in S_{Ti}} P_{Tij}(e, f) = 0, i = 1, \dots, N_B; \quad (6)$$

$$Q_{Gi} + Q_{Ci} + Q_{Ri} - (Q_{Di} - C_i Q_{Di} / P_{Di}) - \sum_{ij \in S_{Li}} Q_{Lij}(e, f) - \sum_{ij \in S_{Ti}} Q_{Tij}(e, f) = 0, i = 1, \dots, N_B; \quad (7)$$

$$e_i f_m - e_m f_i = 0, t = 1, \dots, N_T; \quad (8)$$

$$e_i - k_t e_m = 0, t = 1, \dots, N_T; \quad (9)$$

$$V_{imin}^2 \leq V_i^2 = e_i^2 + f_i^2 \leq V_{imax}^2, i = 1, \dots, N_B; \quad (10)$$

$$k_{tmin} \leq k_t \leq k_{tmax}, t = 1, \dots, N_T; \quad (11)$$

$$P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax}, i = 1, \dots, N_G; \quad (12)$$

$$Q_{Gimin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gimax}, i = 1, \dots, N_G; \quad (13)$$

$$Q_{Cimin} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Cimax}, i = 1, \dots, N_C; \quad (14)$$

$$Q_{Rimin} \leq Q_{Ri} \leq Q_{Rimax}, i = 1, \dots, N_R; \quad (15)$$

$$0 \leq C_i \leq P_{Di}, i = 1, \dots, N_B; \quad (16)$$

$$P_{ij0}(e, f) + \rho_{ij}^{kl} P_{kl0}(e, f) \frac{X_{kl}}{X_{ij}} \leq P_{ij\_weakmax}, ij \in S_{L\_weak}. \quad (17)$$

其中:  $N_B$ 、 $N_T$ 、 $N_G$ 、 $N_C$  和  $N_R$  分别为系统节点数、有载调压变压器台数、发电机节点数、并联电容器节点数和并联电抗器节点数;  $S_{Li}$ 、 $S_{Ti}$  和  $S_{L\_weak}$  分别为与节点  $i$  相连的线路支路集合、有载调压变压器支路集合和薄弱支路集合;  $P_{Di}$  与  $Q_{Di}$  分别为节点  $i$  的有功负荷和无功负荷;  $C_i$  为节点  $i$  的有功负荷削减量, 按照功率因数等比例地削减无功负荷, 这反映在式(7)中;  $\omega_i$  为反映节点  $i$  负荷重要性的权重因子, 可根据电力系统实际情况进行选取。

该模型中的优化变量包括当前正常运行状态下各节点电压的实部  $e$  和虚部  $f$ , 发电机有功出力  $P_G$ , 发电机无功出力  $Q_G$ , 并联电容的注入无功  $Q_C$ , 并联电抗的注入无功  $Q_R$ , 有载调压变压器变比  $k$  以及削负荷量  $C$ 。

式(6)、式(7)为节点有功和无功功率潮流方程,  $P_{Lij}(e, f)$ 、 $Q_{Lij}(e, f)$  以及  $P_{Tij}(e, f)$ 、 $Q_{Tij}(e, f)$  是采用优化变量  $e$ 、 $f$  的二次函数表示的线路支路有功功率、无功功率以及有载调压变压器支路的有功功率、无功功率, 其具体表示形式参见文献[15]。式(8)、(9)是对有载调压变压器支路引入虚拟节点之后的电压转换方程<sup>[15]</sup>。式(10)-(16)分别为系统节点的电压幅值、有载调压变压器变比、发电机注入有功和无功功率、并联电容和并联电抗的注入无功功率以及节点有功负荷削减量的上下限约束。式(17)就是以式(4)表示的关键预想故障下的静态电压稳定约束, 也是预防控制优化变量  $e$ 、 $f$  的二次函数。

笔者所建立的预防控制新模型具有以下特点:

1) 该模型中的等式约束以及静态电压稳定约束, 均如实表达了电力系统中各个变量之间的非线性关系, 保持了电力系统的非线性特点, 从而能从一定程度上克服线性化预防控制优化模型所存在的局限性。

2) 引发系统静态电压稳定问题的薄弱支路数目往往较少, 因此, 以薄弱支路有功功率约束来表示的静态电压稳定约束数目也较少, 从而可降低预防控制模型的规模, 降低其求解难度。

3) 由于描述该预防控制模型的式(5)-(17)均为

预防控制优化变量的一次或者二次函数,因此,该优化模型具有全二次特点。当采用预测-校正原对偶内点法来求解的时候,海森矩阵在内点法优化迭代过程中只需计算一次,而不需要每次迭代都进行更新,由此可进一步降低模型的求解难度。

## 2 静态电压稳定预防控制的计算步骤

笔者所提静态电压稳定预防控制的计算步骤如下:

1)数据初始化。

置整个预防控制过程的迭代次数(为方便说明,笔者称为外迭代次数)为  $K=1$ 。给定 ELSI 的门槛值为  $\alpha$ 。关键预想故障集合包含支路最小 ELSI 小于  $\alpha$  的那些预想故障,置关键预想故障集合  $S_1$  为空。薄弱支路集合包含预想故障下 ELSI 小于  $\alpha$  的所有薄弱支路,置薄弱支路集合  $S_2$  为空。

2)确定关键预想故障与相应的薄弱支路及其功率传送能力。

针对各个预想故障,进行潮流计算。对于潮流不收敛的预想故障,采用文献[16]所提出的最小负荷模型恢复系统在该预想故障下的潮流解。获得系统的潮流解之后,得到各条支路的有功功率及各条支路的 ELSI,将 ELSI 小于  $\alpha$  的支路作为薄弱支路放入集合  $S_2$  中。同时,将这些薄弱支路所对应的预想故障确定为关键预想故障放入集合  $S_1$  中。并根据式(1)估算出薄弱支路在对应的关键预想故障下的功率传送能力。

3)预防控制停止准则。

如果关键预想故障集合  $S_1$  以及薄弱支路集合  $S_2$  均为空,则此时的系统状态满足静态电压稳定预防控制的要求。停止计算,输出预防控制结果。否则转到步骤 4)。

4)预防控制策略的求解。

根据关键预想故障集合  $S_1$  以及薄弱支路集合  $S_2$ ,建立如式(5)-(17)所示的预防控制模型,采用预测-校正原对偶内点法求解,将所得的控制结果施加到当前正常运行状态下的系统上。置预防控制过程的外迭代次数  $K=K+1$ ,返回到步骤 2)。

## 3 仿真分析

### 3.1 测试系统介绍

为了验证笔者所提预防控制新模型的正确性和有效性,针对 IEEE14 节点系统以及 IEEE118 节点系统分别进行仿真分析。在仿真中,为了使这两个系统在预想故障下有可能出现静态电压稳定问题,

对系统进行了如下改造:

1)IEEE14 节点系统中,保持节点功率因数不变,节点 14 的负荷增加至  $53.8+j20.2\text{M}\cdot\text{VA}$ 。记为 IEEE14-1。

2)IEEE14 节点系统中,保持节点功率因数不变,节点 14 有功负荷增加至  $60+j22.6\text{M}\cdot\text{VA}$ 。记为 IEEE14-2。

3)IEEE118 节点系统中,保持节点功率因数不变,节点 43、节点 44、节点 45 负荷分别增加至  $36+j14\text{M}\cdot\text{VA}$ 、 $62+j31\text{M}\cdot\text{VA}$ 、 $140.45+j58.3\text{M}\cdot\text{VA}$ 。

### 3.2 仿真结果分析

为了保证系统在正常状态下具有 15% 的静态电压稳定裕度,该状态下的 ELSI 的门槛值  $\alpha$  取为 1.15;预想故障下,为了保证系统具有 10% 的静态电压稳定裕度,将预想故障下的 ELSI 的门槛值  $\alpha$  取为 1.1。

表 1 针对以上 3 个测试系统,将笔者所提预防控制新模型与文献[9-10]所提预防控制模型各自所包含的静态电压稳定约束数目进行了对比。由表 1 可以看出,笔者以薄弱支路有功功率约束来表示的静态电压稳定约束数目远少于文献[9-10]以参数化潮流等式约束来表示的静态电压稳定约束数目,从而简化了预防控制模型的规模,降低了预防控制模型的求解难度;并且,系统规模越大,笔者所提新模型在这方面的优势越明显。

表 2~4 给出了预防控制的仿真结果。其中,第 1 列给出了预防控制外迭代次数,也就是整个预防控制过程所需要的迭代次数。从外迭代次数可以看出,3 个测试系统的预防控制过程均经过 1 次迭代之后,其控制结果就能使系统在正常运行状态下以及预想故障下满足静态电压稳定要求。第 2~4 列给出了预防控制每次外迭代过程中所包含的关键预想故障,薄弱支路及其 ELSI,可以发现在预防控制之前,关键预想故障下的薄弱支路的 ELSI 都是低于 1.1 的,不满足预想故障下的静态电压稳定要求。由第 5 列可以发现预防控制每次外迭代过程完成之后,薄弱支路的 ELSI 都在 1.1 之上,满足了预想故障下对系统静态电压稳定的要求。第 6~8 列给出了预防控制每次外迭代过程中预测-校正原对偶内点法的迭代次数以及预防控制优化模型的目标,可以发现对 IEEE14-1 系统以及 IEEE118 节点系统而言,不需要切除负荷,就能保证系统在正常运行状态下以及预想故障下的静态电压稳定性;而对于 IEEE14-2 系统来说,则需要切除 6.11MW 的有功负荷才能保证系统在正常运行状态下以及预想故障下

的静态电压稳定性。

以上仿真结果表明,当系统在正常运行状态下或者预想故障下出现静态电压稳定问题的时候,采用笔者所提静态电压稳定预防控制模型对系统实施

预防控制之后,可以使系统在正常运行状态下和预想故障下均满足静态电压稳定要求,提高了系统的静态电压稳定裕度,证明了笔者所提预防控制新模型的正确性和有效性。

表 1 两种预防控制模型中静态电压稳定约束数目的对比

系统名称	关键预想故障数目	静态电压稳定约束数目	
		薄弱支路有功功率约束数目	参数化潮流等式约束数目
IEEE14-1	2	2	56
IEEE14-2	2	2	56
IEEE118	3	3	708

表 2 IEEE14-1 系统的预防控制仿真结果

外迭代次数	关键预想故障	薄弱支路	预防控制前的 ELSI	预防控制后的 ELSI	内点法迭代次数	网络损耗	削负荷量/MW
1	1-2 支路断开	1-5 支路	1.053 5	1.109 1	15	0.507 9	0
	9-14 支路断开	13-14 支路	1.096 7	1.101 8			

表 3 IEEE14-2 系统的预防控制仿真结果

外迭代次数	关键预想故障	薄弱支路	预防控制前的 ELSI	预防控制后的 ELSI	内点法迭代次数	网络损耗	削负荷量/MW
1	1-2 支路断开	1-5 支路	1.036 3	1.108 8	15	0.508 7	6.110 0
	9-14 支路断开	13-14 支路	1.001 1	1.100 1			

表 4 IEEE118 系统的预防控制仿真结果

外迭代次数	关键预想故障	薄弱支路	预防控制前的 ELSI	预防控制后的 ELSI	内点法迭代次数	网络损耗	削负荷量/MW
1	34-43 支路断开	43-44 支路	1.059 8	1.139 5	12	1.343 5	0
	44-45 支路断开	43-44 支路	1.049 9	1.358 2			
	45-46 支路断开	45-49 支路	1.052 6	1.197 4			

### 3.3 预防控制效果验证

为了进一步验证所提预防控制优化模型的正确性和有效性,笔者利用连续潮流法对预防控制的效果进行了仿真分析。为节省篇幅,此处仅针对 IEEE118 节点系统在预想故障 34-43 支路断开的情况下,系统在预防控制前后的负荷裕度进行了比较分析。在连续潮流的仿真过程中,负荷的增长方式采用全网负荷按照节点负荷功率因数不变的条件同步增长。

预防控制前后 43 节点的 PV 曲线如图 1 所示,

其中横坐标表示系统当前运行点距离电压崩溃点的负荷裕度,纵坐标表示 43 节点电压幅值的标幺值。由图可见,在预防控制之前,在支路 34-43 断开的情况下,系统的负荷裕度仅为 0.075 5(7.55%),小于 0.1(10%),不满足系统在预想故障下的静态电压稳定裕度要求<sup>[1]</sup>;而在预想故障后的系统运行点处,43 节点的电压幅值为 0.836 3 p. u.(如图 1 中 A 点所示),低于 0.85p. u.,不满足系统实际运行过程中对节点电压幅值的要求。预防控制之后,在支路 34-43 断开的情况下,系统的负荷裕度为

0.165 1(16.51%),满足了系统在预想故障下的静态电压稳定裕度要求;而 43 节点的电压幅值也上升为 0.907 3 p. u. (如图 1 中 B 点所示),满足了系统对节点电压幅值的运行要求。图 1 所示的仿真结果进一步表明了笔者所提的预防控制优化模型是正确有效的。

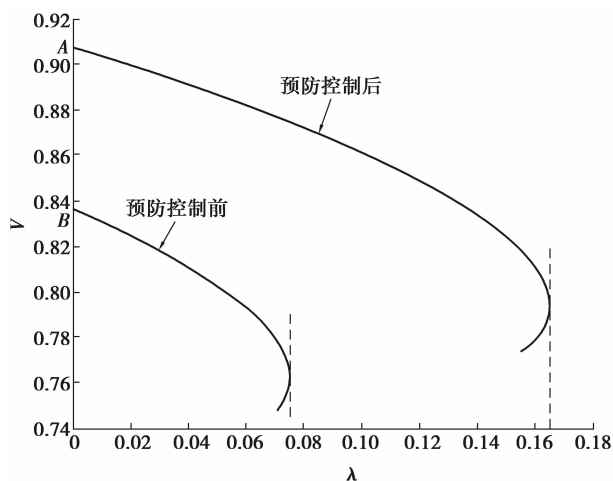


图 1 预防控制前后 34-43 支路断开下  
节点 43 的 PV 曲线

## 4 结 语

笔者提出了以薄弱支路有功功率约束作为静态电压稳定约束的预防控制优化模型。由于该模型的等式约束和不等式约束如实表达了电力系统中各个变量之间的非线性关系,保持了电力系统的非线性特性,因此,该模型从一定程度上克服了线性化预防控制优化模型的缺陷。更为重要的是,由于电力系统中引发静态电压稳定问题的薄弱支路数目往往较少,因此,该预防控制优化模型中包含的静态电压稳定约束数目也较少,从而简化了预防控制优化模型的规模,降低了模型的求解难度。而且,由于该模型具有全二次特点,因此,当采用预测-校正原对偶内点法求解时,能更进一步降低模型的求解难度。IEEE14 以及 IEEE118 节点系统的仿真结果验证了该预防控制模型是正确和有效的,为静态电压稳定预防控制研究提供了新的途径。

### 参考文献:

[1] Feng Z H, Ajarapu V, Maratukulam D. A comprehensive approach for preventive and corrective control to mitigate voltage collapse [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2000, 15 (2): 791-797.

- [2] Capitanescu F, Van cutsem T. Preventive control of voltage security margins: a multicontingency sensitivity-based approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 358-364.
- [3] Zhao J, Zhang B, Chiang H D. An optimal power flow model and approach with static voltage stability constraints[C]// Proceedings of the 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific-Security and Sustainable Development under Deregulation, August 15-17, 2005, Dalian, China. [S.l.]: IEEE Press, 2005: 1-6.
- [4] 赵晋泉, 江晓东, 李华, 等. 一种基于连续线性规划的静态稳定预防控制方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 17-22.  
ZHAO Jinquan, JIANG Xiaodong, LI Hua, et al. A static stability preventive control approach based on successive linear programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 17-22.
- [5] Fu X, Wang X F. A unified preventive control approach considering voltage instability and thermal overload [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1(6): 864-871.
- [6] 刘文博, 张伯明, 吴文传, 等. 在线静态电压稳定预警与预防控制系统[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 6-11.  
LIU Wenbo, ZHANG Boming, WU Wenchuan, et al. An on-line early warning and preventive control system for static voltage stability [J]. Power System Technology, 2008, 32(17): 6-11.
- [7] Yuan Y, Wen X H, Qian K J. Preventive/corrective control for voltage stability based on primal-dual interior point method[C]// Proceedings of the 2006 International Conference on Power Systems Technology (POWERCON), Oct. 22-26, 2006, Chongqing, China. [S.l.]: IEEE Press, 2006: 1-5.
- [9] Wang Q, Ajarapu V. A critical review on preventive and corrective control against voltage collapse [J]. Electric Power Components and Systems, 2001, 12 (29): 1133-1144.
- [9] 郭瑞鹏, 吴浩, 韩祯祥, 等. 在线多预想故障静态电压崩溃预防控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 1-6.  
GUO Ruipeng, WU Hao, HAN Zhenxiang, et al. On-line multi-contingency preventive control to avoid static voltage collapse [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(19): 1-6.

- 属尾矿库概论[R]. 北京:中国有色金属工业总公司,1992.
- [8] 中华人民共和国国家建设部. ZBJ 1-90 选矿厂尾矿设施设计规范[S]. 北京:中国标准出版社,1990.
- [9] 中国有色工程设计研究总院,秦皇岛冶金设计研究总院. AQ 2006-2005 尾矿库安全技术规程[S]. 北京:煤炭工业出版社,2006.
- [10] 梁金建. 德兴铜矿四号尾矿库中线法堆坝生产实践[J]. 中国矿山工程,2008,37(1):5-17,46.  
LIANG Jinjian. Production practice of using dumping dam in centre-line of Dexing No. 4 tailing pool [J]. China Mine Engineering, 2008, 37(1): 5-17, 46.
- [11] 苑莲菊. 工程渗流力学及应用[M]. 北京:中国建材工业出版社,2001.
- [12] 赵坚,沈振中. 尾矿坝复杂排水系统渗流计算方法的改进[J]. 河海大学学报,1997,25(2):110-113.  
ZHAO Jian, SHEN Zhenzhong. Improvement of the calculation method of seepage of complex drainage system of tailings dam [J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(2): 110-113.
- [13] 柳厚祥,宋军,陈克军. 尾矿坝二维固结稳定渗流分析[J]. 矿冶工程,2002,22(4):8-10.  
LIU Houxiang, SONG Jun, CHEN Kejun. Steady seepage analysis of 2D consolidation of tailing dams[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2002, 22(4): 8-10.
- [14] 谢春红,赵文良,张天岭. 地下水不稳定渗流达西速度计算新方法[J]. 岩土工程学报,1996,18(1):68-74.  
XIE Chunhong, ZHAO Wenliang, ZHANG Tianling. A new method to calculate the Darcy's velocity of unstable seepage of underground water [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 68-74.
- [15] 李锡夔,范益群. 非饱和土变形及渗流过程的有限元分析[J]. 岩土工程学报,1998,20(4):20-24.  
LI Xikui, FAN Yiqun. Finite element analysis of deformation and seepage process in unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 20-24.

(编辑 王维朗)

~~~~~

(上接第66页)

- [10] Zhou X S, Luo X J, Peng Z W. Congestion management ensuring voltage stability under multicontingency with preventive and corrective controls [C]//Proceedings of the 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electric Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA. [S. l.]: IEEE Press, 2008: 1-8.
- [11] Taylor C W. Power system voltage stability [M]. New York: McGraw-Hill Inc., 1994.
- [12] 国家电网公司. 电力系统安全稳定导则[EB/OL]. (2005-01-19) [2010-12-01]. <http://www.sgcc.com.cn/fgbz/dwbzgf/37314.shtml>.
- [13] Li W Y, Yu J, Wang Y, et al. Method and system for real time identification of voltage stability via identification of weakest lines and buses contributing to power system collapse: USA, 7816927 [P]. 2010-10-19.
- [14] 吴际舜. 电力系统静态安全分析[M]. 上海:上海交通大学出版社,1985.
- [15] 余娟. 无功优化新模型和算法研究及其在电压稳定风险评估中的应用[D]. 重庆:重庆大学,2007.
- [16] Granville S, Mello J C O, Melo A C G. Application of interior point methods to power flow unsolvability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 1096-1103.

(编辑 王维朗)