

# 基于戴维南等值的静态电压稳定 广域切负荷控制策略

颜伟<sup>1</sup>, 文一宇<sup>1</sup>, 余娟<sup>1</sup>, 庞晓艳<sup>2</sup>, 王伟<sup>2</sup>, 谢开贵<sup>1</sup>

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044;  
2. 四川电力调度通信中心, 四川省 成都市 610041)

## A Wide-Area Load Shedding Strategy Based on Thevenin Equivalence and Considering Static Voltage Stability

YAN Wei<sup>1</sup>, WEN Yiyu<sup>1</sup>, YU Juan<sup>1</sup>, PANG Xiaoyan<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, XIE Kaigui<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology  
(Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China;  
2. Sichuan Electric Power Dispatching Center, Chengdu 610041, Sichuan Province, China)

**ABSTRACT:** In allusion to the problem that it is difficult for regional power network to implement the strategy to response static voltage stability by acquiring real-time status information of exterior power network, a wide-area load shedding control strategy, which is based on the equivalence of single-bus and considering static voltage stability margin of regional power network, is proposed. Firstly, the exterior system equivalence of regional power network is carried out by Thevenin equivalence; then taking the power flow equality constraint of regional power network under load growth as the constraint of static voltage stability, a complete quadratic optimal load shedding model is built and is solved by semi-smooth Newton method. The correctness and effectiveness of the proposed load shedding strategy are verified by simulation results of IEEE 14-bus system.

**KEY WORDS:** wide-area load shedding; static voltage stability; Thevenin equivalence; complete quadratic optimal model; semi-smooth Newton method

**摘要:** 针对区域电网难以通过获取外网实时状态信息来实施静态电压稳定控制的问题,提出了一种基于外部网络单点等值,并考虑区域电网静态电压稳定裕度的广域切负荷控制策略。首先采用戴维南等值方法对区域电网的外部系统进行等值。然后以区域电网在负荷增长状态下的潮流等式约束作为静态电压稳定约束条件,建立了全二次最小切负荷优化模型,并采用半光滑牛顿法求解。通过对IEEE 14节点系统的仿真分析,验证了该策略的正确性及有效性。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51007098)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51007098).

**关键词:** 广域切负荷控制; 静态电压稳定; 戴维南等值; 全二次优化模型; 半光滑牛顿法

## 0 引言

随着现代电力系统的发展,系统的规模不断扩大,网络的结构日趋复杂,环境和经济因素的制约使电力系统的运行情况更加接近极限条件,进而引发安全稳定问题,导致系统崩溃<sup>[1-4]</sup>。因此电力系统的安全稳定问题一直是研究的热点,而其中的静态电压稳定问题也越来越受到关注。

目前针对静态电压稳定问题的控制措施已有较多研究。其中切负荷控制被认为是解决电力系统电压稳定性的一种有效的控制措施,在电力系统中得到了比较广泛的应用研究<sup>[5-7]</sup>。文献[8-11]根据节点电压幅值下降的情况来实施切负荷策略,但电压幅值的高低并不能说明静态电压稳定问题;文献[12-16]则根据节点的静态电压稳定就地指标来实施切负荷策略,但是这种就地切负荷策略所得到的切负荷量不一定是最优的,因为它没有考虑电网中其余部分对该节点静态电压稳定性的影响;文献[17-19]从全网的角度来考虑切负荷策略的实施;文献[17-18]根据静态电压稳定指标对控制量的灵敏度信息作为线性化的静态电压稳定约束条件,建立了线性最优切负荷模型;文献[19]以负荷增长状态下的潮流等式约束作为静态电压稳定约束,建立了能完全反映电力系统非线性特点的最优切负荷模型;文献[17-19]从全网的角度所得到的切负荷控

制结果较文献[12-16]得到的控制结果要精确，但在实际电网的应用中却存在一定的局限性。因为现有电网在管理模式上依然属于分层分区管理，每个区域电网调度中心一般只拥有自身电网的实时状态和模型数据，很难获得外网的实时状态信息。因此从全网的角度来制定区域电网的切负荷策略是难以实现的。要实现区域电网的切负荷策略，必须对区域电网的外部系统进行处理。文献[20]以实现区域电网自身的静态电压稳定控制为目标，直接将外部系统等效成区域电网的平衡节点。但是这种处理方法是无法准确反映外部系统信息，其得到的控制结果也必然存在精度不够的问题。

鉴于此，本文提出基于外部系统等值的区域电网静态电压稳定广域切负荷控制策略。由于实际电网中，区域电网一般都是通过单个或者多个 220kV 变电站与主网连接，其中通过单个 220kV 变电站与主网相连的区域电网占大部分。根据主、配网单点连接的特点，本文将采用戴维南等值方法将区域电网的外部网络进行等值。等值后，将区域电网在负荷增长状态下的潮流等式约束作为静态电压稳定约束，以切负荷量最小为目标，从而实现静态电压稳定广域切负荷控制。为进一步提高切负荷控制策略的求解速度，在文献[21]所提出的全二次无功优化模型的基础上，建立全二次最小切负荷优化模型，并采用文献[22]提出的半光滑牛顿法进行求解。

## 1 广域切负荷控制策略

### 1.1 外部系统的戴维南等值

由区域电网的边界节点向外部系统看，在任意瞬间都可将外部系统等效为一个电势源经等值阻抗向区域电网供电的小规模系统，如图 1 所示<sup>[23]</sup>。图 1 中： $\dot{U}_1$ 、 $\dot{S}_1$  分别为区域电网边界节点上的电压和注入功率相量； $\dot{E}_{eq}$ 、 $Z_{eq}$  分别为外部系统的等值电源电势和等值阻抗。

根据边界节点电压以及注入功率的量测值，可以得到  $\dot{E}_{eq}$ 、 $Z_{eq}$  与  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{S}_1$  的关系为

$$\dot{E}_{eq} - Z_{eq}(\dot{S}_1 / \dot{U}_1)^* = \dot{U}_1 \quad (1)$$

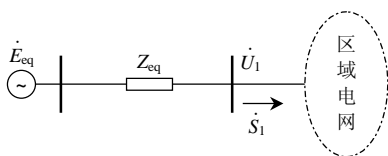


图 1 单点戴维南等值系统

Fig. 1 Diagram of Thevenin equivalent model

将  $\dot{E}_{eq}$ 、 $Z_{eq}$ 、 $\dot{U}_1$ 、 $\dot{S}_1$  写成： $\dot{E}_{eq} = e_{eq} + jf_{eq}$ ， $Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$ ， $\dot{U}_1 = e_1 + jf_1$ ， $\dot{S}_1 = P_1 + jQ_1$ ，由此可得到

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -A & -B \\ 0 & 1 & B & -A \end{bmatrix} [e_{eq} \ f_{eq} \ R_{eq} \ X_{eq}]^T = \begin{bmatrix} e_1 \\ f_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中：

$$A = (P_1 e_1 + Q_1 f_1) / (e_1^2 + f_1^2)$$

$$B = (Q_1 e_1 - P_1 f_1) / (e_1^2 + f_1^2)$$

利用该边界节点上多个时刻的量测数据，即可计算出等值电势  $E_{eq}$  和等值阻抗  $Z_{eq}$ ，从而实现对外部系统的戴维南等值。

### 1.2 最小切负荷优化模型

针对已经将外部系统进行了戴维南等值的区域电网，采用文献[24]提出的改进连续潮流法进行静态电压稳定裕度扫描。如果裕度低于期望值，则启动本文所提的广域切负荷控制策略，得到相应的切负荷控制结果。而这个广域切负荷控制策略是通过最小切负荷优化模型来实现的。

在最小切负荷优化模型中，其目标函数是区域电网中的切负荷量最小。其约束条件不但要考虑当前状态下切负荷之后的潮流等式约束以及各个状态变量和控制变量的可行性约束，还要考虑负荷增长状态下的潮流等式约束以及相应变量的可行性约束。由此可以建立如式(3)~(19)所示的全二次最小切负荷优化模型。

$$F = \min \sum_{i \in N_L} w_{Li} \Delta P_{Li}^0 \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{ij \in S_{Lj}} P_{Lij}^0 + \sum_{ij \in S_{Tj}} P_{Tij}^0 + (P_{Li} - \Delta P_{Li}^0) - P_{Gi}^0 = 0, \quad i = 1, \dots, N_B \quad (4)$$

$$\sum_{ij \in S_{Lj}} Q_{Lij}^0 + \sum_{ij \in S_{Tj}} Q_{Tij}^0 + (Q_{Li} - \Delta P_{Li}^0 Q_{Li}^0 / P_{Li}^0) - Q_{Gi}^0 - Q_{cri}^0 = 0, \quad i = 1, \dots, N_B \quad (5)$$

$$e_i^0 f_m^0 - e_m^0 f_i^0 = 0, \quad t = 1, \dots, N_T \quad (6)$$

$$e_i^0 - k_t^0 e_m^0 = 0, \quad t = 1, \dots, N_T \quad (7)$$

$$U_{i \min}^2 \leq e_i^2 + f_i^2 \leq U_{i \max}^2, \quad i = 1, \dots, N_B \quad (8)$$

$$k_{t \min}^0 \leq k_t^0 \leq k_{t \max}^0, \quad t = 1, \dots, N_T \quad (9)$$

$$Q_{cri \min}^0 \leq Q_{ci}^0 \leq Q_{cri \max}^0, \quad i = 1, \dots, N_{cr} \quad (10)$$

$$0 \leq \Delta P_{Li}^0 \leq P_{Li}^0, \quad i = 1, \dots, N_L \quad (11)$$

$$P_{Gi \min}^0 \leq P_{Gi}^0 \leq P_{Gi \max}^0, \quad i = 1, \dots, N_G \quad (12)$$

$$Q_{Gi \min}^0 \leq Q_{Gi}^0 \leq Q_{Gi \max}^0, \quad i = 1, \dots, N_G \quad (13)$$

$$\sum_{ij \in S_{Lj}} P_{Lij}^1 + \sum_{ij \in S_{Tj}} P_{Tij}^1 + (1 + \lambda)(P_{Li} - \Delta P_{Li}^0) - P_{Gi}^1 = 0, \quad i = 1, \dots, N_B \quad (14)$$

$$\sum_{ij \in S_{L_i}} Q_{Lij}^1 + \sum_{ij \in S_{T_i}} Q_{Tij}^1 + (1+\lambda)(Q_{L_i} - \Delta P_{L_i} Q_{L_i}^0 / P_{L_i}^0) -$$

$$Q_{G_i}^1 - Q_{cr_i}^0 = 0, \quad i=1, \dots, N_B \quad (15)$$

$$e_i^1 f_m^1 - e_m^1 f_i^1 = 0, \quad t=1, \dots, N_T \quad (16)$$

$$e_i^1 - k_t^0 e_m^1 = 0, \quad t=1, \dots, N_T \quad (17)$$

$$P_{G_{i \min}}^1 \leq P_{G_i}^1 \leq P_{G_{i \max}}^1, \quad i=1, \dots, N_G \quad (18)$$

$$Q_{G_{i \min}}^1 \leq Q_{G_i}^1 \leq Q_{G_{i \max}}^1, \quad i=1, \dots, N_G \quad (19)$$

式中：优化状态变量包括 2 个状态下节点的电压实部  $e$  和虚部  $f$ ，但不包括戴维南等值电源点的电压实部和虚部；优化控制变量包括 2 个状态下的发电机有功出力  $P_G$  以及发电机无功出力  $Q_G$ ；当前状态下的有载调压变压器变比  $k_t$ ；并联无功补偿设备的注入无功功率  $Q_{cr}$ ；各个负荷节点的有功负荷切除量  $\Delta P_L$ ； $N_B$  为系统的实际节点数； $N_L$  为系统的负荷节点数； $N_T$  为有载调压变压器台数； $N_G$  为发电机节点数； $N_{cr}$  为并联电容器节点数； $S_{T_i}$  为与节点  $i$  相连的有载调压变压器支路集合； $S_{L_i}$  为与节点  $i$  相连的线路及无载调压变压器支路集合； $\Delta P_{L_i}$  是节点  $i$  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(5)及式(15)中； $w_{L_i}$  为切负荷控制的权重，其具体取值可根据工程需要进行调整。式(4)一(7)、(14)一(17)均为全二次模型的等式约束，其详细公式推导参看文献[21]。

式(4)一(13)表示当前状态下切负荷后的系统运行约束，其中各个变量以上标 0 来表示。式(14)一(19)表示考虑负荷增长  $\lambda$  之后的系统运行约束，其中的各个变量以上标 1 来表示。负荷的增长裕度  $\lambda$  表征了期望的系统静态电压稳定裕度，可以根据系统实际需要而设定。

式(8)一(13)分别为当前运行状态下系统原有节点的电压幅值、有载调压变压器变比、发电机注入有功和无功功率、并联无功补偿设备的注入无功功率以及节点有功负荷削减量的上下限约束。由于在负荷增长状态下，有载调压变压器以及并联无功补偿设备都未来得及动作，且此时对区域系统静态电压稳定裕度的要求高于对各节点电压幅值的要求。所以对于该状态下的变量可行性约束仅考虑发电机有功出力和无功出力的上下限约束，如式(18)(19)所示。

以上所建立的考虑区域电网静态电压稳定裕度的最小切负荷优化模型，具有以下特点：

1) 该模型是在将外部网络进行戴维南等值的基础上建立的。从理论上来说，利用该模型所得到

的切负荷控制结果较直接将外部系统等效为一个平衡节点所得到的控制结果精确。

2) 2 个潮流状态中，等值电源点的电压幅值和相角保持不变，为常数，在优化中不作为优化变量。这与文献[17-19]所提出的基于全网信息的切负荷控制策略是不同的。

3) 由于描述该预防控制模型的式(3)一(19)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，每个函数的海森矩阵是常数矩阵，在半光滑牛顿法的整个优化过程中只需要计算一次，而不需要每次迭代都进行更新，从而提高了模型的求解速度，也降低了编程难度。

### 1.3 广域切负荷控制策略的实施步骤

基于前面所阐述的外部系统戴维南等值以及所建立的最小切负荷优化模型，考虑静态电压稳定裕度的广域切负荷控制策略的实施流程如下：

1) 利用所研究的区域电网边界节点上的量测数据，采用戴维南等值方法，将区域电网的外部系统进行单点等值。

2) 采用文献[24]所提出的改进连续潮流算法对等值后的区域电网进行静态电压稳定裕度扫描。如系统当前负荷裕度大于期望值，则停止计算，并输出控制结果；如其负荷裕度小于期望值，则转入步骤 3)。

3) 针对等值后的区域电网，建立如式(3)一(19)的最小切负荷优化模型，并采用半光滑牛顿法<sup>[22]</sup>进行求解。将所得结果施加到当前运行状态下的系统上，返回到步骤 2)。

## 2 仿真分析

### 2.1 测试系统

为达到区域电网仅通过一个边界节点与外部系统相连，实现外部系统戴维南等值的目的，仿真中对 IEEE 14 节点系统做了如下改造：在原系统基础上，断开支路 6-11、12-13、13-14；去掉变压器 4-9；停运母线 8 上的发电机，并在母线 8 上增加一个负荷；母线 9 上增设并联电容器，其最大补偿容量为 0.4 pu。改造后的 IEEE14 节点系统结构如图 2 所示。选择该系统中的节点 7、8、9、10、11 以及 14 构成一个区域电网，如图 2 中的虚线框部分所示，节点 4 作为其边界节点。为了使区域电网在重负荷情况下保持区域电网中各节点功率因数不变，使区域电网中各节点负荷增加到基态时的 1.32 倍。

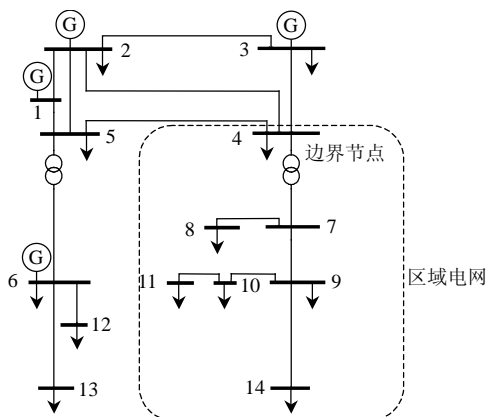


图2 改造后的IEEE 14节点系统

Fig. 2 Diagram of IEEE 14-bus modified system

## 2.2 测试方案

为验证本文所提广域切负荷控制策略的正确性和有效性,仿真中对以下3种方案进行对比分析。

方案1:保持外部系统的完整性,不对外部系统进行等值,从整个系统的角度出发,建立如式(3)—(19)所示的最优切负荷模型,实现基于全网信息的区域电网最优切负荷控制。

方案2:采用本文所提的广域切负荷控制策略,对外部系统进行戴维南等值,并针对等值后的区域电网,建立如式(3)—(19)所示的最优切负荷模型,得到切负荷控制结果。

方案3:按照文献[20]的方法,将外部系统直接作为区域电网的平衡节点,并针对区域电网建立如式(3)—(19)所示的最优切负荷模型,实现区域电网的切负荷控制。

在仿真中,系统静态电压稳定裕度的期望值 $\lambda$ 设为5%,半光滑牛顿优化算法的收敛精度为 $10^{-6}$ 。

## 2.3 仿真结果

首先采用2.1节所提方法对图2中区域电网的外部系统进行戴维南等值,得到相应的戴维南等值模型参数如下: $E_{eq}=0.9973-j0.1303$ ;  $Z_{eq}=-0.003+j0.0555$ 。

分别采用2.2节中所提的3种方案对改造后的IEEE14节点系统进行切负荷控制,其仿真结果如表1所示。

由表1中方案1和方案2的仿真结果可知,2种方案在切负荷控制前,所得到的区域电网的静态电压稳定裕度相差不大,由此证明了方案2中对外部系统采取戴维南等值的方法是可行的。实施切负荷控制之后,方案1和方案2的切负荷量均为零;且此时区域电网的静态电压稳定裕度基本相同。由此更进一步证明了本文所提切负荷控制策略的正

表1 各方案控制前后区域系统运行情况  
Tab. 1 The condition of the region system with or without load shedding control

方案名称	区域系统静态电压稳定裕度/%		区域系统电压/pu		切负荷量占总负荷的比例/%
	控制前	控制后	控制前	控制后	
	方案1	1.4296	17.47	0.655-j0.946	
方案2	1.2800	18.55	0.655-j0.946	0.935-j0.987	0.00
方案3	4.6800	25.96	0.655-j0.946	0.877-j0.946	1.62

确性和有效性。

对比表1中方案1、方案2和方案3的仿真结果可以发现,采用方案3的方法所得到的区域电网在控制之前的静态电压稳定裕度比方案1和2都高,由此证明了方案3在判断区域电网的静态电压稳定裕度方面是不准确的。由其控制结果也可以发现,该方案所得到的切负荷控制结果与方案1和2中所得到的切负荷控制结果相比有较大误差。这进一步说明了采用方案3中的方法来处理外部系统对区域电网的影响是欠妥的。而本文所采用的方法能较为真实地反映外部系统的影响,进而提高切负荷控制精度。

由以上仿真结果看出,方案2在判断区域电网静态电压稳定裕度方面以及实现区域电网的切负荷控制方面,具有较高的精度。同时也说明在无法获知全网信息的情况下,方案2可正确有效地对区域电网的静态电压稳定性做出判断进而实施切负荷控制策略。

## 3 结论

本文针对区域电网的特点,提出了基于戴维南等值的静态电压稳定广域切负荷控制策略。该策略通过戴维南等值方法计及了外部系统对区域电网的影响;并以负荷增长状态下的潮流等式约束为静态电压稳定约束,较为合理地考虑了静态电压稳定的要求。由于策略采用了全二次优化模型,计算过程中海森矩阵只需修正1次,可提高模型求解速度。本文所提出的广域切负荷策略,可为区域电网的静态电压稳定控制研究提供参考。

需要说明的是,本文所提的广域切负荷控制策略只考虑了区域电网仅通过一个边界节点与外部系统相连的情况,而通过多个边界节点与外部系统相连的情况将是进一步需要研究的内容。

## 致谢

本文的研究工作得到了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项目的资助(2007DA10512709103), 在此表示感谢。

## 参考文献

- [1] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术, 2003, 27(9): T2-T6.  
Hu Xuehao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected North America power grid[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): T2-T6(in Chinese).
- [2] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8.14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-11.  
Yin Yonghua, Guo Jianbo, Zhao Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11(in Chinese).
- [3] 唐葆生. 伦敦南部地区大停电及其教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 1-6.  
Tang Baosheng. Blackout in South of London and its lessons[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 1-6(in Chinese).
- [4] 屈靖, 郭剑波. “九五”期间我国电网事故统计分析[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 60-62.  
Qu Jing, Guo Jianbo. Statistics and analysis of faults in main domestic power systems from 1996 to 2000[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 60-62(in Chinese).
- [5] Taylor C W. Concepts of undervoltage load shedding for voltage stability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(2): 480-488.
- [6] 傅旭, 王锡凡. 考虑节点负荷波动的静态电压稳定预防控制方法[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 12-15.  
Fu Xu, Wang Xifan. A preventive control method of static voltage stability considering node load stochastic fluctuation[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 12-15(in Chinese).
- [7] 黄滨, 赵良, 马世英, 等. 基于PV曲线的低压减载配置方法[J]. 电网技术[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 29-34.  
Huang Bin, Zhao Liang, Ma Shiyang, et al. Undervoltage load shedding configuration based on PV curve[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 29-34(in Chinese).
- [8] Lefebvre D, Moors C, Cutsem T V. Design of an undervoltage load shedding scheme for the Hydro-Quebec system[C]//Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Canada: IEEE, 2003: 2030-2036.
- [9] Otomega B, Glavic M, Cutsem T V. Distributed undervoltage load shedding[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 2283-2284.
- [10] Cutsem T V, Vournas C D. Emergency voltage stability controls: an overview[C]//Power Engineering Society General Meeting. Tampa, USA: IEEE, 2007: 1-10.
- [11] Moors C, Lefebvre D, Cutsem T V. Load shedding controllers against voltage instability: a comparison of designs[C]//Power Tech Proceedings. Porto, Portugal: IEEE, 2001: 1-6.
- [12] Balanathan R, Pahalawatth N C, Annakkage U D. A strategy for undervoltage load shedding in power systems[C]//1998 International Conference on Power System Technology. Beijing, China: IEEE, 1998: 1494-1498.
- [13] Tsai S S, Wong K H. Adaptive undervoltage load shedding relay design using Thevenin equivalent estimation[C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [14] Tuan T Q, Fandino J, Hadjsaid N, et al. Emergency load shedding to avoid risks of voltage instability using indicators[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 341-351.
- [15] 余文杰, 方勇杰. 一种基于 SMARTDevice 的低压切负荷算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 57-60.  
Yu Wenjie, Fang Yongjie. An undervoltage load shedding method based on smart device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 57-60(in Chinese).
- [16] 傅旭, 王锡凡. 一种新的节点静态电压稳定指标及切负荷算法[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 8-12.  
Fu Xu, Wang Xifan. A new index of nodal static voltage stability and load shedding method[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 8-12(in Chinese).
- [17] Echavarren F M, Lobato E, Rouco L. A corrective load shedding scheme to mitigate voltage collapse[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2006, 28(1): 58-64.
- [18] Cai G L, Zhang Y J, Chen R Y, et al. A fast corrective load shedding control scheme to prevent AC/DC systems voltage collapse[J]. European Transactions on Electrical Power, 2009, 19(6): 869-879.
- [19] Sadati N, Amraee T, Ranjbar A M. A global particle swarm-based-simulated annealing optimization technique for under-voltage load shedding problem[J]. Applied Soft Computing, 2009, 9(2): 652-657.
- [20] Zhao J Q, Huang W Y, Fang Z X, et al. On-line voltage stability monitoring and control (VSMC) system in Fujian power grid[C]//Power Engineering Society General Meeting. Tampa, USA: IEEE, 2007: 1-6.
- [21] 余娟, 颜伟, 徐国禹, 等. 基于预测-校正原对偶内点法的无功优化新模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 146-151.  
Yu Juan, Yan Wei, Xu Guoyu, et al. A new model of reactive optimization based on predictor corrector primal dual interior point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 146-151(in Chinese).
- [22] 张永平, 童小娇, 吴复立, 等. 基于非线性互补问题函数的半光滑牛顿最优潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 130-135.  
Zhang Yongping, Tong Xiaojiao, Wu Fuli, et al. Study on semi-smooth Newton optimal power flow algorithm based on nonlinear complementarity problem function [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 130-135(in Chinese).
- [23] 刘明松, 张伯明, 姚良忠, 等. 基于 PMU 和改进戴维南等值模型的电压稳定在线监视[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 6-10.  
Liu Mingsong, Zhang Boming, Yao Liangzhong, et al. On-line voltage stability monitoring based on PMU and improved Thevenin equivalent model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 6-10(in Chinese).
- [24] 张尧, 张建设, 袁世强. 求取静态电压稳定极限的改进连续潮流法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(2): 21-25.  
Zhang Yao, Zhang Jianshe, Yuan Shiqiang. Improved continuation power flow algorithm for obtaining the limit of static voltage stability [J]. Proceedings of Electric Power System and Automation, 2005, 17(2): 21-25(in Chinese).



颜伟

收稿日期: 2010-12-10。

作者简介:

颜伟(1968), 男, 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: cqyanwei@21cn.com;

文一字(1984), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统稳定分析与控制研究, E-mail: kgb672@hotmail.com;

余娟(1980), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力系统无功优化、最优潮流方面的研究;

庞晓艳(1968), 女, 硕士, 长期从事电网运行管理工作。

(责任编辑 王晔)