

考虑节点负荷波动的静态电压稳定预防控制方法

傅 旭, 王锡凡

(西安交通大学 电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

A Preventive Control Method of Static Voltage Stability Considering Node Load Stochastic Fluctuation

FU Xu, WANG Xi-fan

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Considering node load fluctuation, the probability index of node voltage instability is presented, and a preventive method to reduce the probability index of node voltage instability is proposed, in which the minimum of voltage magnitude of weak node is taken as objective function, and by means of adjusting generator outputs and load shedding the probability index of node voltage instability is reduced. Simulation results of a certain 682-bus system show that because of considering the variation of power factor of loads as well as load fluctuation, the proposed preventive method can reflect the fluctuation of power factor and load level, and possesses following advantages: higher calculation speed, less calculation amount and simplicity of program design, etc.

KEY WORDS: power system; static voltage stability; preventive control; node load; fluctuation

摘要:介绍了考虑节点负荷波动的节点静态电压失稳概率指标,提出了一种降低节点静态电压失稳概率指标的预防控制方法。该方法以薄弱节点的电压幅值最小为目标函数,通过调整发电机出力 and 切负荷降低节点静态电压的失稳概率指标。某 682 节点系统的仿真计算结果表明,该方法考虑了负荷功率因数的变化和负荷波动,具有计算量小、计算速度快、程序设计简单等优点。

关键词: 电力系统; 静态电压稳定; 预防控制; 节点负荷; 波动

0 引言

电力系统的安全运行一直是电力工作者研究的热点^[1-8]。电压稳定是保证系统安全运行的必要条件。许多研究人员从不同角度提出了提高系统电压

稳定性的方法^[9-18]。文献[16]根据负荷裕度对控制变量的灵敏度,提出了提高静态电压稳定裕度的预防控制方法。文献[17]用 L 指标来反映系统的静态电压稳定程度,若 L 指标不满足要求,则采用切负荷等控制措施提高 L 指标。文献[18]通过快速恢复系统潮流解,提出了提高静态电压稳定裕度的校正控制方法。虽然上述方法可在一定程度提高系统电压的稳定性,但均没有考虑负荷的随机波动等问题。文献[19]提出了考虑负荷波动的节点静态电压失稳概率指标,但在进行预防控制时没有考虑各切负荷节点之间的协调问题和切负荷后的功率平衡问题。

本文将提出一种降低节点静态电压失稳概率指标的预防控制方法,并给出降低节点静态电压失稳概率指标的非线性优化和线性优化模型。某 682 节点系统的仿真计算结果表明,采用线性优化方法求解该线性优化模型时,计算量小且计算简单。

1 节点静态电压失稳概率指标

节点静态电压失稳概率指标示意图^[19]见图 1。

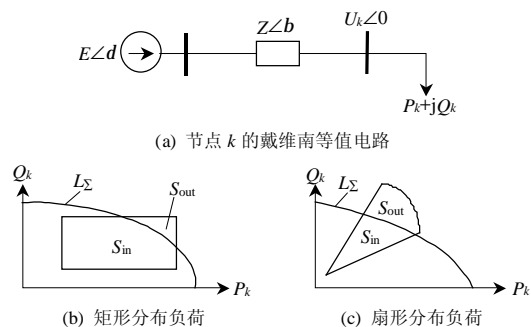


图 1 节点静态电压失稳概率指标示意图
Fig. 1 Illustration of bus voltage collapse probability index

基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助项目(2004CB217905)。
Project Supported by Special Fund of the National Priority Basic Research of China (2004CB217905).

图1(a)中: P_k 和 Q_k 分别为节点 k 的有功负荷和无功负荷; $E \angle d$ 为戴维南等值电势; $U_k \angle 0$ 为节点 k 的电压; $Z \angle b$ 为戴维南等值阻抗。图1(b)(c)中: L_Σ 为根据电路理论计算出的节点最大功率边界曲线; S_{in} 和 S_{out} 分别为负荷功率位于边界曲线内和边界曲线外的面积。根据电路理论, 图1(b)(c)中的边界曲线可以表示为

$$L_\Sigma = \frac{E^2}{2Z[1 + \cos(b - q)]} \quad (1)$$

式中 q 为节点 k 的负荷功率因数角。比较边界曲线 L_Σ 和负荷波动模型, 则节点 i 的电压失稳概率指标^[19]为

$$p_i = \frac{S_{out}}{S_{in} + S_{out}} \quad (2)$$

由式(2)可以看出, 上述节点静态电压失稳概率指标考虑了负荷波动的影响, 更符合系统的实际情况, 也更有利于发现系统的薄弱节点。

2 降低节点静态电压失稳概率指标的预防控制方法

2.1 薄弱节点的选择

当节点的静态电压失稳概率指标大于临界值时, 需要采用控制措施使各个节点的静态电压失稳概率指标低于临界值。由于上述静态电压失稳概率指标的计算较复杂, 本文提出了一种间接降低节点静态电压失稳概率指标的预防控制方法。

本文选择满足下式的节点为系统的薄弱节点:

$$p_i > kp_{lim} \quad (3)$$

式中: p_{lim} 为预先设定的节点电压失稳概率指标的临界值; 保险系数 k 一般取 0.8~0.9, 用于防止节点静态电压失稳概率指标低于临界值但接近临界值的节点在预防控制作用后变成薄弱节点。为便于计算, 本文对上述薄弱节点进行规格化处理, 即

$$c_i = p_i / p_{max} \quad (i = 1, 2, \dots, L) \quad (4)$$

式中: L 为薄弱节点的总数; p_{max} 为所有负荷节点中电压失稳概率指标的最大值。

2.2 节点电压优化模型

2.2.1 非线性优化模型

从静态电压稳定的角度, 提高薄弱节点的电压幅值将有利于提高节点的静态电压稳定性, 因此本文通过提高薄弱节点电压幅值降低节点静态电压的失稳概率, 其非线性优化模型的目标函数为

$$\min \left[-\sum_{i \in W} (c_i U_i) \right] \quad (5)$$

式中: W 为式(4)确定的薄弱节点的集合; U_i 为薄弱节点 i 的电压幅值。式(5)的约束条件为

$$g(\mathbf{U}, \mathbf{d}, \mathbf{u}_0 + \Delta \mathbf{u}) = 0 \quad (6)$$

$$t_{i,\min} \leq t_i(\mathbf{U}, \mathbf{d}, \mathbf{u}_0 + \Delta \mathbf{u}) \leq t_{i,\max} \quad (7)$$

$$w_j^+ \Delta u_j^+ + w_j^- \Delta u_j^- \leq \mathbf{a} \quad (8)$$

$$0 \leq \Delta u_j^+ \leq u_{j,\max} - u_{j,0} \quad (9)$$

$$0 \leq \Delta u_j^- \leq u_{j,0} - u_{j,\min} \quad (10)$$

其中式(6)为系统潮流约束条件: \mathbf{U} 为节点电压幅值; \mathbf{d} 为节点电压相角; $\Delta \mathbf{u}$ 和 \mathbf{u}_0 分别为待求控制变量及其初始值; 式(7)中: $t_i(\mathbf{U}, \mathbf{d}, \mathbf{u}_0 + \Delta \mathbf{u})$ 为约束 i (线路功率或节点电压幅值); $t_{i,\min}$ 和 $t_{i,\max}$ 分别为 t_i 的下限和上限; 式(8)为控制费用约束条件, 其物理意义是在控制费用低于 \mathbf{a} 的约束下尽可能地提高薄弱节点的电压幅值, 在每次迭代中 \mathbf{a} 是给定的, 具体数值可根据系统具体情况而定, 式中 Δu_j^+ 和 Δu_j^- 分别为控制变量 u_j 的正负调整量, w_j^+ 和 w_j^- 分别为 u_j 的正负调整报价, 当切负荷时 $\Delta u_j^+ = 0$ 。式(9)(10)为控制变量的约束条件, $u_{j,0}$ 、 $u_{j,\max}$ 和 $u_{j,\min}$ 分别为控制变量 u_j 的初始值、上限和下限。

2.2.2 线性优化模型

文献[20]采用非线性内点法求解 2.2.1 节中的非线性优化模型, 得到了较准确的计算结果, 但计算速度较慢。为加快求解速度^[18], 本文将式(5)~(10)转化为线性优化模型, 其目标函数为

$$\min \left[-\sum_{i \in W} (c_i \Delta U_i) \right] = \min \left[-\sum_{i \in W} c_i \left(\sum_{j=1}^{n_c} \frac{\partial U_i (\Delta u_j^+ - \Delta u_j^-)}{\partial u_j} \right) \right] \quad (11)$$

式中: n_c 为控制变量的总数; $\partial U_i / \partial u_j$ 为节点 i 的电压幅值对控制变量 u_j 的灵敏度。式(11)的约束条件为

$$t_{i,\min} \leq t_{i,0} + \sum_{j=1}^{n_c} \left[\frac{\partial t_i (\Delta u_j^+ - \Delta u_j^-)}{\partial u_j} \right] \leq t_{i,\max} \quad (12)$$

$$w_j^+ \Delta u_j^+ + w_j^- \Delta u_j^- \leq \mathbf{a} \quad (13)$$

$$0 \leq \Delta u_j^+ \leq u_{j,\max} - u_{j,0} \quad (14)$$

$$0 \leq \Delta u_j^- \leq u_{j,0} - u_{j,\min} \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^{n_c} (\Delta u_j^+ - \Delta u_j^-) = 0 \quad (16)$$

式(12)中的 $\partial t_i / \partial u_j$ 为约束 i (线路功率或节点电压幅值)对控制变量 u_j 的灵敏度, $t_{i,0}$ 为 t_i 的初始值; 式(16)为忽略网络损耗变化的功率平衡约束条件。降

低节点静态电压失稳概率指标的计算流程见图 2。

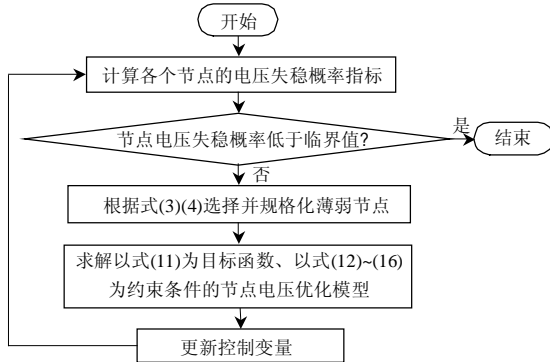


图 2 降低节点静态电压失稳概率指标的计算流程

Fig. 2 Flowchart for decreasing the probability index of node voltage instability

2.3 控制变量的选取

在求解上述优化模型时,为减少参与优化的控制变量、提高求解速度,通常只选择对目标函数值影响较大的控制变量参与优化,因此本文提出了一种基于等值灵敏度的控制变量选择法。

首先定义 2 个加权的等值灵敏度,即

$$\begin{cases} A_j^+ = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{\partial U_i / \partial u_j}{w_j^+} \\ A_j^- = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{\partial U_i / \partial u_j}{w_j^-} \end{cases} \quad (17)$$

式中: L 为薄弱节点的总数; A_j^+ 和 A_j^- 分别为 u_j 的正、负调整量的等值灵敏度,反映了 u_j 对所有薄弱节点电压幅值的综合作用,考虑了 u_j 的控制费用。由式(17)得到的 u_j 的等值灵敏度为

$$A_j = \max(|A_j^+|, |A_j^-|) \quad (18)$$

根据 A_j 的大小可以对控制变量排序,并选择等值灵敏度较大的控制变量参与优化。

3 算例分析与比较

3.1 算例分析

为验证上述模型和方法的正确性和有效性,本文以 2004 年我国某 682 节点系统^[21]为例进行仿真分析。假设某典型运行方式下各个负荷节点的波动模型呈矩形分布,各个负荷节点的有功负荷和无功负荷的最大值为当前负荷的 1.2 倍。假设当节点电压失稳概率指标大于 0.1 时,切负荷或调整发电机有功出力。

算例 1: 系统中参与波动的负荷节点为 170~173、175~177、180、185、188~191、194、196~197、614、620、623、627、631、641、644、663、672、676、679。系统中节点静态电压失稳概率指标大于临界值的节点见表 1。采用本文方法得

到的节点静态电压失稳概率指标见表 2。根据上述分析,为使电压稳定指标低于临界值而采取的预防控制策略见表 3。

表 1 节点静态电压失稳概率指标大于临界值的节点及其失稳概率(算例 1)

节点号	190	196	197
失稳概率	0.317	0.194	0.238

表 2 采用本文方法得到的节点静态电压失稳概率指标(算例 1)

节点号	190	196	197
失稳概率	0.095	0.092	0.097

表 3 预防控制策略(算例 1)

策略	节点	调整量/pu
切负荷	190	0.221
	196	0.039
	197	0.066
调发电机出力	263	-0.325
	265	-0.001

算例 2: 假设系统中所有负荷节点的负荷都参与波动,节点静态电压失稳概率指标大于临界值的节点见表 4。采用本文方法得到的节点静态电压失稳概率指标见表 5。根据上述分析,为使电压稳定指标低于临界值而采取的预防控制策略见表 6。

表 4 节点静态电压失稳概率大于临界值的节点(算例 2)

节点号	109	110	111	112
失稳概率	0.466	0.522	0.530	0.521

表 5 采用本文方法得到的节点静态电压失稳概率指标(算例 2)

节点号	109	110	111	112
失稳概率	0.091	0.096	0.086	0.091

表 6 预防控制策略(算例 2)

策略	节点	调整量/pu
切负荷	109	0.117
	110	0.104
	111	0.081
	112	0.036
调发电机出力	307	-0.126
	314	-0.212

3.2 线性优化方法和非线性优化方法的比较

本文采用线性优化方法和非线性优化方法求解 2.2 节中的节点电压优化模型,其计算时间比较结果见表 7, k 为采用线性优化方法求解该模型的计算时间与非线性优化方法计算时间的比值。由表 7 可知, k 约为 1/5, 因此线性优化方法更适于求解上述模型。

表7 采用不同优化方法求解节点电压优化模型的
计算时间比较结果

Tab. 7 Comparative results of calculation time when
solving the optimal model of node voltage
by different optimal methods

算例	计算时间/s		k
	线性优化方法	非线性优化方法	
1	1.253	7.830	0.16
2	1.987	9.465	0.21

4 结论

本文用考虑负荷波动的节点静态电压失稳概率指标反映节点的静态电压稳定性,使分析结果更符合实际情况,并以薄弱节点的电压幅值为目标函数,通过调整发电机出力 and 切负荷使节点静态电压失稳概率指标低于临界值。本文采用线性优化方法求解节点电压优化模型,计算量小、计算速度快。每次线性优化中的控制成本 a 需根据线性优化的有效区间和系统的具体情况而定。

参考文献

- [1] 韩祯祥,曹一家.电力系统的安全性及防治措施[J].电网技术,2004,28(9):1-6.
Han Zhenxiang, Cao Yijia. Power system security to ensure reliable delivery[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6(in Chinese).
- [2] 何大愚.一年以后对美加“8.14”大停电事故的反思[J].电网技术,2004,28(21):1-5.
He Dayu. Rethinking over '8.14' US-Canada blackout after one year [J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 1-5(in Chinese).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] 默哈莫德·夏班,刘皓明,李卫星,等.静态安全约束下基于 Benders 分解算法的可用传输容量计算[J].中国电机工程学报,2003,23(8):7-11.
Mohamed Shaaban, Liu Haoming, Li Weixing, et al. ATC calculation with steady-state security constraints using benders decomposition [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 7-11(in Chinese).
- [6] 戴剑锋,王海超,周双喜,等.基于负荷裕度随机特性的电压失稳概率问题研究[J].中国电机工程学报,2006,26(13):26-30.
Dai Jianfeng, Wang Haichao, Zhou Shuangxi, et al. A study on probability of voltage instability based on the stochastic characteristic of load margin index[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 26-30(in Chinese).
- [7] 江伟,王成山,余贻鑫,等.考虑支路故障情况下的静态电压稳定分析[J].中国电机工程学报,2006,26(13):20-25.
Jiang Wei, Wang Chengshan, Yu Yixin, et al. Static voltage stability

- analysis considering branch outage contingency[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 20-25(in Chinese).
- [8] 王锡凡.电力市场条件下电网的安全保证体系[J].电网技术,2004,28(9):7-13.
Wang Xifan. Electric network security setup in electricity market environment[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 7-13(in Chinese).
 - [9] Canizares C A, Alvarado F L. Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 1-8.
 - [10] Ajarapu V, Christy C. The continuation power flow: a toll for steady state voltage stability analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 416-423.
 - [11] Cutsem T V. A method to compute reactive power margins with respect to voltage collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1): 145-156.
 - [12] Lu J, Liu C W, Thorp J S. New methods for computing a saddle-node bifurcation point for voltage stability analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 978-989.
 - [13] Parker C J, Morrison I F, Sutanto D. Application of an optimization method for determining the reactive margin from voltage collapse in reactive power planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1473-1481.
 - [14] Gao B, Morsion G K. Voltage stability evaluation using modal analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(4): 1529-1542.
 - [15] Lof P A, Smed T, Anderson G, et al. Fast calculation of a voltage stability index[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 54-64.
 - [16] Capitanescu F, Van Cutsem T. Preventive control of voltage security margins: a multicontingency sensitivity-based approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 358-364.
 - [17] El-Sladek M Z, Mahmoud G A, Dessouky M M, et al. Optimum load shedding for avoiding steady-state voltage instability[J]. Electric Power Systems Research, 1999, 50(2): 119-123.
 - [18] Feng Z, Ajarapu V. A comprehensive approach for preventive and corrective control to mitigate voltage collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 791-797.
 - [19] 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):8-12,17.
Fu Xu, Wang Xifan. A new index of nodal static voltage stability and load shedding method[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 8-12,17(in Chinese).
 - [20] 傅旭,王锡凡.静态安全分析中的联动切负荷算法[J].中国电机工程学报,2006,26(9):82-86.
Fu Xu, Wang Xifan. New approach to load-shedding in static security analysis of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 82-86(in Chinese).
 - [21] Geraldo L T, Victor H U. An interior point method for nonlinear optimal power flow using voltage rectangular coordinates[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(4): 1211-1218.

收稿日期:2007-03-26。

作者简介:

傅旭(1976—),男,博士研究生,从事电力系统分析与安全控制方面的研究工作, E-mail: fuxumail@gmail.com;

王锡凡(1936—),男,教授,博士生导师,从事电力系统分析及电力市场方面的研究工作。

(编辑 杜宁)