

考虑静态安全约束的分布式电源准入容量计算

夏成军, 崔弘, 王强, 张尧

(华南理工大学 电力学院, 广东省 广州市 510640)

Penetration Capacity Calculation for Distributed Generation Considering Static Security Constraints

XIA Cheng-jun, CUI Hong, WANG Qiang, ZHANG Yao

(College of Electrical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Network-connected distributed generation (DG) brings a series of impacts on distribution network, so it is of importance to study the bearable DG capacity of a distribution system under the tendency that a lot of DGs urgently need to be connected. Based on the analysis of impacts of DG on voltage profile and power flow of distribution network as well as the impacts of the power factor and position, where the DG is grid-connected, on penetration capacity, a mathematical model of penetration capacity of DG is built when static security constraints of power grid are considered. Under the condition of multi-DGs, a bi-layer optimization model to calculate penetration capacity and corresponding optimized solution algorithm are proposed. Through the case study on actual distribution system the correctness and effectiveness of the proposed method are verified.

KEY WORDS: distributed generation (DG); distribution network; static security; penetration capacity; bi-level optimization

摘要: 分布式电源的接入给配电网带来了一系列影响, 在大量分布式电源亟待并网运行的趋势下, 研究一个系统能够承受的分布式电源容量具有重要意义。该文分析了分布式电源对配电网电压分布和线路潮流的影响以及分布式电源并网位置和功率因数对准入容量的影响, 从电力系统静态安全约束的角度出发, 建立了计算分布式电源准入容量的数学模型。对于多个分布式电源的情况, 提出了准入容量计算的双层优化模型和相应的优化求解算法, 并通过对实际配电系统进行分析, 验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: 分布式电源(DG); 配电网; 静态安全; 准入容量; 双层优化

0 引言

目前, 分布式电源(distributed generation, DG)

的应用多以接入配电网运行为主, 其接入使配电系统从放射状无源网络变为遍布负荷和中小型电源的有源网络。这将对系统的潮流分布、继电保护、网络损耗、电能质量、电网可靠性以及电网调度产生重要影响^[1-2], 这些都可能影响到电力系统的安全运行。随着分布式电源的进一步发展, 一个给定的系统到底最多能接入多大容量的分布式电源逐渐成为电力运行及规划人员十分关心的问题。

分布式电源的准入容量是指在满足一定技术指标的前提下, 系统所能接受的分布式电源的最大容量^[3]。根据系统的不同要求, 分布式电源准入容量的确定可以有不同的数学模型。文献[4]从系统暂态稳定的角度出发, 综合考虑系统运行方式、扰动方式、机组自身保护以及稳定判据等因素的影响, 分析各种因素影响下满足暂态稳定判据的最大接入功率, 并取其中最小者作为分布式电源的准入容量。文献[5-6]考虑分布式电源接入对配电网继电保护的影响, 在尽量不改变现有配电保护装置的情况下, 提出了计及短路电流约束的分布式电源准入容量计算模型。此外, 文献[7-10]还提出了分布式电源准入容量的解析计算方法。这些解析方法实质上是优化方法的特例, 其特点是采用了若干较强的假设, 因此应用范围受到限制。

本文将分析分布式电源的接入对配电网电压分布和线路潮流的影响, 在此基础上采用优化方法, 把分布式电源准入容量的问题归结为在系统静态安全约束下的分布式电源有功功率最大化问题, 分别建立单个和多个分布式电源准入容量的数学模型, 给出相应的求解算法。最后以实际配电系统为例进行计算, 并分析分布式电源并网位置和功率

因数对准入容量的影响。

1 分布式电源对电压分布和线路潮流的影响

1.1 分布式电源对电压分布的影响

连接到配电网的分布式电源，根据并网接口的不同，可以有不同的模型^[11]。考虑到负荷的特殊需求以及环保和经济性的要求，分布式电源往往需要运行在额定工况附近，且要求有功、无功出力变化较小。同时为简化分析，本文将把分布式电源作为具有恒定功率因数的 PQ 节点。分布式电源的位置一般靠近负荷中心，因此可假设分布式电源接入在负荷节点上。

在图 1 所示的链式配电网的第 i 个负荷节点处安装分布式电源，为不失一般性， i 不限定为末节点。分布式电源的接入使得 i 位置向前向后看到的负荷发生了变化，负荷节点的电压有所上升。因减少了馈线中传输的功率，同时还有分布式电源无功出力的支持，接入分布式电源对负荷节点的电压支撑是有利的。

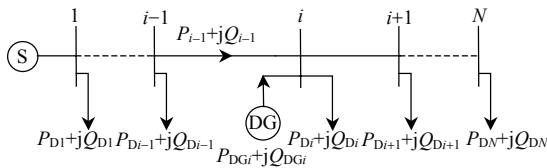


图 1 含分布式电源的辐射网络

Fig. 1 Radial distribution network with DG

文献[12]的研究结果表明，分布式电源的接入位置和容量对线路电压分布的影响很大：1) 相同容量的分布式电源接入不同位置时所形成的电压分布差别很大，分布式电源接入点越接近末节点，对线路电压分布的影响越大，分布式电源越接近系统母线，对线路电压分布的影响越小；分布式电源集中在同一节点，对电压的支持效果要弱于分布在多个节点上。2) 在不改变分布式电源接入位置的情况下，总出力越多，与负荷的比值越高，电压支撑作用越大，整体电压水平越高。因此，如果分布式电源接入容量或位置选择不当，分布式电源就可能使得某些节点的电压越限。

1.2 分布式电源对线路潮流的影响

根据第 i 个节点处负荷的有功 P_{Di} 与分布式电源的有功出力 P_{DG_i} 的大小关系，负荷与配电网间的有功流动有如下 3 种情况：

- 1) 当 $P_{DG_i} > P_{Di}$ 时，该节点可看成是一个向配电网注入容量为 $P_{DG_i} - P_{Di}$ 有功功率的电源节点。
- 2) 当 $P_{DG_i} = P_{Di}$ 时，配电网和该节点间不存在

有功功率流动。

- 3) 当 $P_{DG_i} < P_{Di}$ 时，配电网向该负荷节点提供容量为 $P_{Di} - P_{DG_i}$ 的有功功率。

可以看出，当该路径只有节点 i 上有分布式电源且其有功出力大于该线路节点 i 至 N 上负荷的有功功率总和时，线路潮流 P_{i-1} 的方向与预设的方向相反，出现了反向潮流。如果该分布式电源的容量过大，线路潮流甚至可能超过容许值。

2 单电源时考虑静态安全约束的模型

电力系统的网络结构是根据系统电源和负荷的分布位置规划设计的，在保证系统安全的前提下，电力系统的网络结构能够满足系统正常运行的需要。分布式电源的接入改变了系统的电源分布，即使在负荷不变的情况下，系统的潮流方式也要发生改变，这种变化往往是在系统的规划阶段没有考虑到的。因此，分布式电源接入系统以后是否会危及系统的静态安全是研究分布式电源准入容量首先要考虑的因素。本文的静态安全约束指标主要是线路潮流不过载，节点电压不越限。

假设负荷水平给定，只有一个分布式电源连接在节点 α ，其无功和有功出力的控制比例系数为 f_α 。对于 N 节点系统，令 U 、 θ 分别代表节点电压和相角， P 、 Q 分别代表节点有功功率和无功功率，则

$$P_i(U, \theta) = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (i \in N) \quad (1)$$

$$Q_i(U, \theta) = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (i \in N) \quad (2)$$

式中 G 和 B 分别为导纳矩阵的实部和虚部。则求解分布式电源准入容量的数学模型可表示为

$$\max P_{DG_\alpha} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } P_{Gi} - P_{Di} - P_i(U, \theta) = 0 \quad (i \in N) \quad (4)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - Q_i(U, \theta) = 0 \quad (i \in N) \quad (5)$$

$$Q_{DG_\alpha} = f_\alpha P_{DG_\alpha} \quad (6)$$

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (i \in N) \quad (7)$$

$$|I_{ij}| \leq I_{ij\max} \quad (i, j \in N, i \neq j) \quad (8)$$

式中： N 为节点集合； P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为 i 节点处电源的有功、无功出力； P_{DG_α} 、 Q_{DG_α} 分别为接入节点 α 的分布式电源的有功、无功出力； P_{Di} 、 Q_{Di} 分别为节点 i 负荷的有功、无功功率； $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 分别为节点 i 电压的上限、下限； $|I_{ij}|$ 和 $I_{ij\max}$ 分别为线路 $i-j$ 的电流幅值和电流限值。

上述方程描述的问题可采用简便易行的枚举

法结合二分法求解，即给定一个分布式电源的容量，求解网络的潮流方程式，如果节点电压和线路潮流水平满足静态安全约束的要求，再增加分布式电源的容量，重复上述计算，直到分布式电源容量不能再增加为止。图 2 给出了单电源接入时准入容量的计算流程，其中“大数” $P_b^{(0)}$ 为使潮流方程的解违反节点电压或线路潮流约束的某个值。

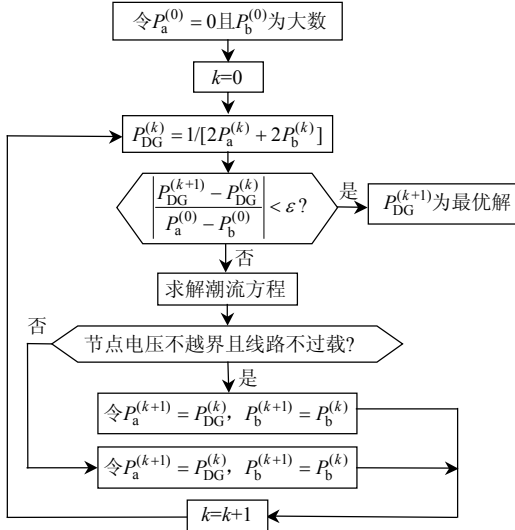


图 2 单电源时准入容量的计算流程

Fig. 2 Calculation flow chart of penetration capacity with single generator

3 多电源时考虑静态安全约束的模型

在多个分布式电源同时接入的情况下，如果将单电源的模型简单推广，则得到的准入容量将是乐观的结果^[13]。

现在假设系统存在 2 个分布式电源，其具体位置分别确定在节点 α 、 β ，相应的有功出力分别为 $P_{DG\alpha}$ 、 $P_{DG\beta}$ 。此时，如果将单电源的模型加以简单推广，求解以 $P_{DG\alpha} + P_{DG\beta}$ 为目标函数的优化问题，设其解为 $\hat{P}_{DG\alpha}$ 、 $\hat{P}_{DG\beta}$ ，获得的准入容量为 $\hat{P}_{DG\alpha} + \hat{P}_{DG\beta}$ 。然而，这样很可能找到另外一种分布式电源注入容量的组合 $(P'_{DG\alpha}, P'_{DG\beta})$ ，该组合满足 $P'_{DG\alpha} + P'_{DG\beta} \leq \hat{P}_{DG\alpha} + \hat{P}_{DG\beta}$ ，但在这个运行状态下，却不满足系统的静态安全约束。

因此，在 2 个分布式电源的情况下，本文所要求的准入容量应该是保守估计下的准入容量 $P_{DG\min-max}$ ，它是最“恶劣”情况下系统所能容纳的分布式电源最大容量^[14-15]。根据要求， $P_{DG\min-max}$ 应该满足：1) 当 $P_{DG\alpha} + P_{DG\beta} \leq P_{DG\min-max}$ 时，对于任意组合的 $(P_{DG\alpha}, P_{DG\beta})$ 均满足式(7)(8)；2) 满足上述条件的 $P_{DG\min-max}$ 应尽可能大。

因此，在节点 α 、 β 处接入分布式电源时，设其无功功率 $Q_{DG\alpha}$ 、 $Q_{DG\beta}$ 和有功功率 $P_{DG\alpha}$ 、 $P_{DG\beta}$ 的控制比例系数分别为 f_α 、 f_β ，则准入容量的求解可以用如下双层优化模型来表示：

$$\max P_{DG\alpha} + P_{DG\beta} \quad (9)$$

$$\text{s.t. } P_{Gi} - P_{Di} - P_i(U, \theta) = 0 \quad (i \in N) \quad (10)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - Q_i(U, \theta) = 0 \quad (i \in N) \quad (11)$$

$$P_{DG\alpha} = f_\alpha Q_{DG\alpha} \quad (12)$$

$$P_{DG\beta} = f_\beta Q_{DG\beta} \quad (13)$$

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (i \in N) \quad (14)$$

$$|I_{ij}| \leq I_{ij\max} \quad (i, j \in N, i \neq j) \quad (15)$$

$$\max_{P'_{DG\alpha}, P'_{DG\beta}} U_i(P'_{DG\alpha}, P'_{DG\beta}) \leq U_{i\max}, P'_{DG\alpha} + P'_{DG\beta} \leq \hat{P}_{DG\alpha} + \hat{P}_{DG\beta} \quad (16)$$

$$\max_{P'_{DG\alpha}, P'_{DG\beta}} |I_{ij}(P'_{DG\alpha}, P'_{DG\beta})| \leq I_{ij\max}, P'_{DG\alpha} + P'_{DG\beta} \leq \hat{P}_{DG\alpha} + \hat{P}_{DG\beta} \quad (17)$$

求解上述模型的关键是式(16)(17)，由于 $(P_{DG\alpha}, P_{DG\beta})$ 组合的任意性，双层规划模型是一个 NP-hard 问题^[16]，现有的解法只能针对某些特殊形式的双层模型求解，没有统一的解法。对于双电源准入容量的计算，文献[14]给出了一种实用算法，不断改变 2 个电压有功出力的比例，然后采用上文介绍的单电源算法计算准入容量的大小，取其中最小者作为准入容量的计算结果。但当存在 2 个以上电源时，由于分布式电源有功出力的组合方式随分布式电源数目的增多而剧增，因此上述方法的运算量也会急剧增加，目前还没有一种有效的算法求解双层优化问题^[16]。

4 算例结果与分析

4.1 单电源接入时分布式电源准入容量的计算

下文以文献[12]给出的 21 个节点的配电系统为例，基准功率取 100 MVA，电压基值取 10 kV，系统母线电压取 1.05 pu。分布式电源并网前，系统运行在正常状态。选取节点 1、4、7、10、12、15、17、20 作为并网节点，根据本文提出的方法，分别计算分布式电源的准入容量，结果如表 1 所示。

由表 1 可知，随着并网节点从系统母线附近向馈线末端逐渐后移，分布式电源的准入容量越来越小，其分布趋势见图 3。

表 1 单电源接入时的准入容量

Tab. 1 Penetration capacities of single generator								
并网节点	1	4	7	10	12	15	17	20
准入容量/MW	8.3	7.9	7.4	6.7	5.9	4.7	4.0	3.5

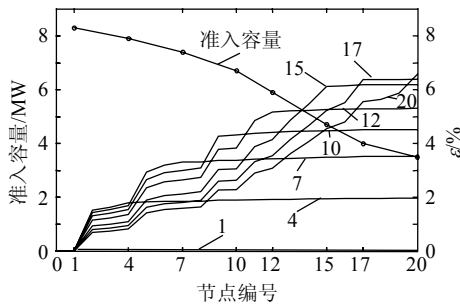


图 3 DG 并网后的节点电压变化率与准入容量分布趋势
Fig. 3 Voltage change rate after interconnecting DG and distribution trend of penetration capacity

从计算过程来看, 对于上述配电系统, 制约分布式电源准入容量的主要原因是分布式电源无功注入引起的节点电压越限, 而线路潮流一直没有发生过载。当在系统母线附近的节点处接入分布式电源时, 分布式电源对系统电压的抬升作用有限; 而当并网位置逐渐远离系统母线时, 分布式电源对系统电压的抬升作用越来越显著。因此根据本文 1.1 节的分析, 在线路潮流不过载的情况下, 系统能够容纳的分布式电源的容量将随着并网位置的后移而不断越小。

设节点 i 并网前电压为 U_i , 并网后电压为 U'_i , 采用下式作为衡量节点电压变化率的指标, 节点变化率越大, 说明该点电压受分布式电源并网的影响越大:

$$\varepsilon = (U'_i - U_i) / U_i \quad (18)$$

分别在以上选取的各节点接入有功出力为准入容量的分布式电源, 得到的节点电压变化率曲线如图 3 所示, 图中曲线标号对应于分布式电源接入的节点号。

由图 3 可知, 节点电压变化率曲线位于并网点以前时, 斜率较大, 变化率上升较快, 并在并网点附近接近于最大值, 之后曲线逐渐趋于水平, 节点电压变化率与并网点近似相等。这说明分布式电源的接入, 只对并网点以前各节点的电压变化影响较大, 并网点后各节点的电压只是被动地跟随并网点电压的变化而变化。

由图 3 还可知, 并网点靠近于系统母线时, 曲线相对较平缓, 准入容量下降较慢, 过了馈线中间位置后, 准入容量快速减小。

图 3 中 2 条曲线的变化趋势刚好相反, 说明分布式电源并网点位置不同, 引起的系统节点电压变化率也不同, 这决定了准入容量的变化趋势。

4.2 双电源接入时分布式电源准入容量的计算

2 个分布式电源同时接入电网时, 为分析影响准入容量的有关因素, 本文设计了 4 种接入方案:

1) 2 个分布式电源分别接入系统母线附近(节点 1)和馈线中部(节点 10); 2) 2 个分布式电源分别接入节点 5 和 15; 3) 2 个分布式电源分别接入馈线中部(节点 10)和末端(节点 20); 4) 并网位置和方案 3 相同, 但功率因数由 0.9 提高到 0.95。针对以上方案, 改变后一个电源有功出力占 2 个电源总有功出力的比例, 分别计算准入容量, 结果如图 4 所示。

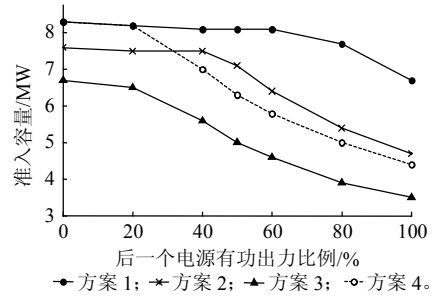


图 4 不同并网方案下准入容量的计算结果
Fig. 4 The results of penetration capacity by different schemes

采用方案 1~4 时, 准入容量的计算结果分别为: 8.3 MW 到 6.7 MW 之间、7.6 MW 到 4.7 MW 之间、6.7 MW 到 3.5 MW 之间、8.3 MW 到 4.4 MW 之间, 相应区间的最小值为 6.7 MW、4.7 MW、3.5 MW、4.4 MW, 即 4 种方案所要求的准入容量计算结果。

方案 1、2 和 3 的准入容量计算结果表明, 随着分布式电源并网位置由系统母线附近向馈线末端后移, 准入容量明显呈下降趋势, 这和单电源接入方式得到的结论相同。

对比方案 3 和 4 的计算结果可知, 在并网位置和双电源有功出力分配比相同的情况下, 功率因数高的方案对应的准入容量较大。这主要是由于, 原有配电网系统节点电压符合要求, 接入分布式电源以后, 在分布式电源接入位置和有功出力相同的情况下, 功率因数越小, 无功出力越多, 相应地对系统节点电压的抬升效果越明显, 系统节点电压越容易越限。所以在系统参数和并网位置相同的情况下, 分布式电源的准入容量随其功率因数的增大而增大。

方案 3 和 4 的结果说明, 为了提高准入容量, 应该使分布式电源尽量减少无功出力, 并维持较高的功率因数。其实, 这对于维持整个系统的稳定运行也是有好处的, 因为根据现行的分布式电源并网规程, 当配电网出现故障时, 出于自动重合闸配置及安全运行的考虑, 要求分布式电源迅速退出, 直到故障清除一定时间(约 5 min)后才能重新接入系统^[7]。如果在系统正常运行时, 分布式电源的功率因数偏低, 过多地参与系统电压调节, 故障后分布

式电源的退出将会造成大量无功缺额, 系统电压波动较大, 从而增加系统故障恢复的难度。

5 结论

1) 本文建立的考虑静态安全约束的计算分布式电源准入容量的数学模型及其优化算法能够方便地确定分布式电源的准入容量。当电源数目较多时, 求解将很复杂, 如何采用有效的算法求解有待进一步研究。

2) 分布式电源准入容量受到系统结构、分布式电源并网位置和功率因数的影响。对于一个并网前正常运行的系统, 分布式电源并网位置越靠近馈线末端, 准入容量越大。提高分布式电源的功率因数, 尽量减少无功出力, 可以提高准入容量。

3) 本文未考虑与分布式电源并网运行有关的动态约束, 所以按照本文模型得到的准入容量结果可能偏于乐观, 因此要最终确定一个系统能接受的分布式电源容量, 需在全面考虑系统各种运行方式和安全稳定运行的约束条件的基础上综合优化分析。

参考文献

- [1] 梁才浩, 段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 53-56.
Liang Caihao, Duan Xianzhong. Distributed generation and its impact on power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 53-56(in Chinese).
- [2] 陈海焱, 段献忠, 陈金富. 分布式发电对配网静态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 27-30.
Chen Haiyan, Duan Xianzhong, Chen Jinfu. Impacts of distributed generation on steady state voltage stability of distribution system [J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 27-30(in Chinese).
- [3] Carpinell I G, Celli G, Mocci S, et al. Optimization of embedded generation sizing and siting by using a double trade-off method [J]. IEEE Proceedings of Generation Transmission and Distribution, 2005, 152(4): 503-513.
- [4] 申洪, 梁军, 戴慧珠. 基于电力系统暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 8-11.
Shen Hong, Liang Jun, Dai Huizhu. Calculation of wind power penetration based on power system transient stability analysis [J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 8-11(in Chinese).
- [5] 雷金勇, 黄伟, 夏翔, 等. 考虑相间短路影响的分布式电源准入容量计算[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 82-86.
Lei Jinyong, Huang Wei, Xia Xiang, et al. Penetration level calculation with considerations of phase-to-phase short circuit fault [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 82-86(in Chinese).
- [6] 连欣乐, 吴政球, 赵柯宇, 等. 计及短路电流约束的分布式电源准入容量的计算[J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(1): 50-55.
Lian Xinle, Wu Zhengqiu, Zhao Keyu, et al. Maximum penetration capacity calculation for distributed generation taking into account fault current constraints[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2008, 23(1): 50-55(in Chinese).
- [7] Kim T E, Kim J E. A method for determining the introduction limit of distributed generation system in distribution system[C]. Proceedings of IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, British Columbia, Canada, 2001.
- [8] Kim T E, Kim J E. Considerations for the feasible operating range of distributed generation interconnected to power distribution system[C]. Proceedings of IEEE PES Summer Meeting, Chicago, IL, USA, 2002.
- [9] Kim T E, Kim J E. Voltage regulation coordination of distributed generation system in distribution system[C]. Proceedings of IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, British Columbia, Canada, 2001.
- [10] Bhowmik A, Maitra A, Halpin S M, et al. Determination of allowable penetration levels of distributed generation resources based on harmonic limit considerations[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(2): 619-624.
- [11] Delfino B. Modeling of the integration of distributed generation into the electrical system[C]. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, IL, USA, 2002.
- [12] 王志群, 朱守真, 周双喜. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 56-60.
Wang Zhiqun, Zhu Shouzheng, Zhou Shuangxi. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 56-60(in Chinese).
- [13] 胡骅, 吴汕, 夏翔, 等. 考虑电压调整约束的多个分布式电源准入功率计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 13-17.
Hu Hua, Wu Shan, Xia Xiang, et al. Computing the maximum penetration level of multiple distributed generators in distribution network taking into account voltage regulation constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 13-17(in Chinese).
- [14] 黄伟, 黄民翔, 赵学顺, 等. 基于主从递阶决策模型的 TRM 评估[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 17-21.
Huang Wei, Huang Minxiang, Zhao Xueshun, et al. Transmission reliability margin assessment based on leader-follower decision-making model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 17-21(in Chinese).
- [15] Gan D, Luo X, Bourcier D V. Min-max transfer capability of transmission interface[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2003, 25(5): 347-353.
- [16] Bard J F. Practical bilevel optimization: algorithms and applications. Boston[M]. MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [17] IEEE Std. 1547-2003, Standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[S].



夏成军

收稿日期: 2009-03-18。

作者简介:

夏成军(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、HVDC 及 FACTS 等;

崔弘(1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制、分布式电源, E-mail: xjtudacui@126.com;

王强(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制;

张尧(1948—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统安全与稳定、电力市场。

(责任编辑 杜宁)