

基于连续潮流的配电网供电能力评估

黄兵, 赵晋泉

(可再生能源发电技术教育部工程研发中心(河海大学), 江苏 南京 210098)

摘要:随着非全相运行的分布式电源大量接入配电网,配电网固有的三相不平衡特征更加突出,传统配电网供电能力评估因忽略配电网三相不平衡特征导致结果不准确。为了准确分析三相不平衡特征对配电网最大供电能力评估的影响,建立了以配电网供电负荷参数最大为目标函数,考虑了支路热约束和节点电压等状态变量和分布式电源的有功和无功功率等控制变量的含分布式电源三相不平衡配电网供电能力评估模型。选择电压跌落情况最严重的相作为连续参数,确保预测-校正过程的连续潮流法求解的结果更加精确。最后,采用拓展的 IEEE33 节点配电系统进行仿真验证,表明文中所提的模型和求解方法是有效的。

关键词:供电能力;三相不平衡;配电网;连续潮流;分布式电源

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)01-0014-05

0 引言

配电网作为连接输电网和终端用户的中间环节,其作用是将输电网输送过来的电能以高效优质的形式供给用户。因此,基于配电网运行方式和网络拓扑结构,准确地计算配电网供电能力对于主动配电网的规划、优化运行和控制具有重要意义^[1]。

配电网供电能力评估研究主要借鉴输电网输电能力^[2]的概念来开展,即在给定的配电网运行方式下,模拟配电网节点上负荷的增长模式,不断检验配电网中支路潮流和节点电压等约束条件,从而确定配电网所能供给的最大供电负荷。文献[3—5]提出了基于直流潮流的配电网供电能力评估模型,并采用线性规划法进行求解,只需一次优化计算,具有求解速度快的特点,但由于不计及无功功率损耗和电压降落的影响,计算结果精度还有待提高。文献[1]建立了基于交流潮流的配电网供电能力评估模型,并且采用重复潮流法求解该模型。但是,当配电网供电能力计算过程中出现电压崩溃情形,这种方法将无法进行求解。文献[6]提出了一种基于最优潮流法的配电网最大供电能力评估方法,该方法对约束条件有较强的处理能力,还可以对有功和无功功率进行优化计算,评估结果更准确。最优潮流法在计算配电网供电能力时涉及非线性方程的处理和系统资源的优化调度,因此其计算速度较慢。

收稿日期:2018-09-07;修回日期:2018-10-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577049);国家电网有限公司科技项目“配电网调控一体化系统建设模式与辅助分析关键技术研究及深化应用”

近年来,随着电动汽车、柔性负荷以及非全相运行的分布式电源(distributed generator, DG)大量接入配电网,其固有的三相不平衡特征更加突出^[7—10]。如果采用单相模型进行配电网分析,将导致其结果不准确^[11],因此配电网分析采用三相模型已成共识^[12—13]。针对三相不平衡配电网,文献[14]建立了以负荷参数最大为目标的三相不平衡配电网最大供电能力计算模型,并用最优潮流法求解该模型。该方法考虑配电网三相不平衡特征对配电网最大供电能力的影响,但未考虑 DG 对配电网最大供电能力的影响。

针对以上问题,提出一种含 DG 三相不平衡配电网供电能力评估模型,该模型以配电网最大供电负荷为目标函数,考虑节点电压、支路潮流和变压器容量等约束条件。基于预测-校正过程的连续潮流法进行求解,该算法不仅考虑了电压和无功功率对配电网最大供电能力的影响,也考虑到配电网首先发生的是电压稳定越限。最后,采用拓展的 IEEE33 节点配电系统进行仿真验证,表明所提的模型和求解方法的有效性。

1 含 DG 三相不平衡配电网供电能力评估

含 DG 三相不平衡配电网供电能力评估是指模拟配电网中的 DG 和负荷的功率增长,求取满足节点三相功率平衡、节点电压限值、支路电流限值和变压器容量等约束条件下的含 DG 三相不平衡配电网所能供给的最大负荷值。

1.1 负荷和 DG 的增长模式

为了模拟负荷和 DG 的功率变化,将负荷参数引入到负荷和 DG 的增长模式中。因此,负荷和 DG

的功率变化可以表示为:

$$\begin{cases} P_{Gi}^\beta = P_{Gi0}^\beta + \lambda \Delta P_{Gi}^\beta \\ Q_{Gi}^\beta = Q_{Gi0}^\beta + \lambda \Delta Q_{Gi}^\beta \\ P_{Li}^\beta = P_{Li0}^\beta + \lambda \Delta P_{Li}^\beta \\ Q_{Li}^\beta = Q_{Li0}^\beta + \lambda \Delta Q_{Li}^\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中: β 表示 a、b、c 三相之一; P_{Gi}^β , Q_{Gi}^β 分别为节点 i 的 β 相接入分布式电源后的有功和无功出力; P_{Gi0}^β , Q_{Gi0}^β 分别为配电网初始态下节点 i 的 β 相 DG 的有功和无功出力; λ 为配电网负荷参数, 即节点负荷注入增长变化率; P_{Li0}^β , Q_{Li0}^β 分别为配电网初始态下节点 i 的 β 相负荷的有功和无功功率; P_{Li}^β , Q_{Li}^β 分别为配电网节点 i 的 β 相负荷的有功和无功功率; ΔP_{Gi}^β , ΔQ_{Gi}^β , ΔP_{Li}^β 和 ΔQ_{Li}^β 分别为节点 i 的 β 相 DG 的有功和无功出力、负荷的有功和无功功率的预设增长量。

1.2 目标函数

根据配电网供电能力评估的定义, 含 DG 三相不平衡配电网最大供电能力评估的目标函数可描述为:

$$\text{Max } \lambda \quad (2)$$

1.3 约束条件

1.3.1 功率平衡约束

$$P_{Gi}^\beta - P_{Li}^\beta - e_i^\beta \sum_{j \in \Omega_B} \sum_{\gamma=a,b,c} (G_{ij}^{\beta\gamma} e_j^\gamma - B_{ij}^{\beta\gamma} f_j^\gamma) - f_i^\beta \sum_{j \in \Omega_B} \sum_{\gamma=a,b,c} (G_{ij}^{\beta\gamma} f_j^\gamma + B_{ij}^{\beta\gamma} e_j^\gamma) = 0 \quad i \in \Omega_B \quad (3)$$

$$Q_{Gi}^\beta - Q_{Li}^\beta - f_i^\beta \sum_{j \in \Omega_B} \sum_{\gamma=a,b,c} (G_{ij}^{\beta\gamma} e_j^\gamma - B_{ij}^{\beta\gamma} f_j^\gamma) + e_i^\beta \sum_{j \in \Omega_B} \sum_{\gamma=a,b,c} (G_{ij}^{\beta\gamma} f_j^\gamma + B_{ij}^{\beta\gamma} e_j^\gamma) = 0 \quad i \in \Omega_B \quad (4)$$

式中: e_i^β , f_i^β 分别为节点 i 的 β 相电压的实部和虚部; $G_{ij}^{\beta\gamma}$, $B_{ij}^{\beta\gamma}$ 分别为节点导纳矩阵中的节点 i 的 β 相与节点 j 的 γ 相对应元素的实部和虚部; Ω_B 是配电网中节点的集合。

1.3.2 状态变量约束

$$I_{k,\min}^\beta \leq I_k^\beta \leq I_{k,\max}^\beta \quad k \in F \quad (5)$$

式中: I_k^β 为支路 k 的 β 相电流幅值; $I_{k,\max}^\beta$, $I_{k,\min}^\beta$ 分别为支路 k 的 β 相电流幅值的上下限; F 为配电网中所有支路的集合。

$$V_{i,\min}^2 \leq (e_i^\beta)^2 + (f_i^\beta)^2 \leq V_{i,\max}^2 \quad i \in \Omega_B \quad (6)$$

式中: $V_{i,\max}$, $V_{i,\min}$ 分别为节点 i 电压幅值的上下限。

1.3.3 控制变量约束

$$P_{Gi,\min}^\beta \leq P_{Gi}^\beta \leq P_{Gi,\max}^\beta \quad i \in N_D \quad (7)$$

$$Q_{Gi,\min}^\beta \leq Q_{Gi}^\beta \leq Q_{Gi,\max}^\beta \quad i \in N_D \quad (8)$$

式中: $P_{Gi,\max}^\beta$, $P_{Gi,\min}^\beta$ 分别为节点 i 的 β 相接入 DG 后有功出力的上下限; $Q_{Gi,\max}^\beta$, $Q_{Gi,\min}^\beta$ 分别为节点 i

的 β 相接入 DG 后无功出力的上下限; N_D 为 DG 接入配电网中所有节点的集合。

2 基于连续潮流法的配电网供电能力评估方法及流程

基于连续潮流的含 DG 三相不平衡配电网供电能力评估的基本思路是: 从当前的运行点出发, 模拟可控 DG 和负荷的功率变化, 检验潮流计算后配电网的状态变量, 判断是否有约束条件越限情况发生, 反复该过程, 直到支路电流和节点电压等静态约束发生越限为止。基于连续潮流法求解含 DG 三相不平衡配电网供电能力可分为参数化方程、预测过程、校正过程和步长控制 4 个环节。

2.1 参数化方法

参数化方程是连续潮流法求解配电网供电能力的关键, 主要是为了构造一个线性化方程, 从而避免在电压崩溃处雅可比矩阵奇异的问题^[15-17]。因此, 文中采用局部几何参数化方法, 选择电压跌落情况最严重的相作为连续参数。

$$x_k: |dV_i^\beta| = \max \left\{ \max_{\beta=a,b,c} |dV_1^\beta|, \dots, \max_{\beta=a,b,c} |dV_{\Omega_B}^\beta| \right\} \quad (9)$$

式中: dV_i^β 为节点 i 的 β 相电压切向量中的元素。

2.2 预测过程

预测过程的目的是求解得到一个近似解, 为校正过程的迭代计算提供初值。由于切线预测法具有识别临界点和计算过程简单的特点, 文中采用切线预测法^[18], 可根据式(10)得到切向量。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \theta} & \frac{\partial f}{\partial V^p} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \\ \mathbf{e}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV^p \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: θ_i^p , V_i^p , λ_i 分别为当前运行点的电压相角、电压幅值和负荷参数; f 为常规潮流方程; \mathbf{e}_m 为行向量, 其中第 m 个元素为 1, m 代表配电网节点电压跌落最严重的节点编号, 其他元素均为 0。

解出切向量后, 可通过式(11)计算预测过程后的运行点:

$$\begin{bmatrix} \theta_{i+1}^p \\ V_{i+1}^p \\ \lambda_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_i^p \\ V_i^p \\ \lambda_i \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ dV^p \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: θ_{i+1}^p , V_{i+1}^p , λ_{i+1} 分别为预测过程后运行点的电压相角、电压幅值和负荷参数; σ 为步长。

2.3 校正过程

校正过程以预测过程得到的解为初值, 采用牛顿法求解拓展潮流方程(12)。

$$\begin{bmatrix} f(\theta^p, V^p, \lambda) \\ G(\theta^p, V^p, \lambda) \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

式中: $G(\theta^p, V^p, \lambda)$ 为参数化过程中构造的线性化方程。

2.4 步长控制

步长的选取对连续潮流法的有效性至关重要,如果步长过大,计算结果的准确度很难保证;如果步长过小,收敛速度就会很慢。鉴于这种情况,采用变步长的策略逐步进行迭代计算,若约束条件没有发生越限,则以原步长继续进行迭代计算;若有越限发生,则原步长减半,如此反复,直到步长减小到满足精度要求为止。

2.5 求解步骤

文中提出的基于连续潮流法求解含 DG 三相不平衡配电网供电能力流程如图 1 所示。

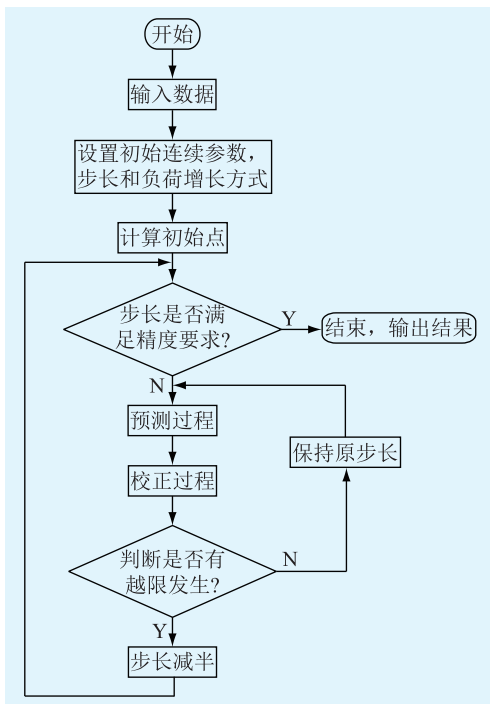


图 1 算法流程

Fig.1 Flow chart of the proposed algorithm

3 算例分析

为了验证所提的模型和求解方法的有效性,采用修正的 IEEE33 节点配电系统进行仿真验证,在节点 7、16、23 和 31 分别接入 DG,如图 2 所示。拓展的 IEEE33 节点配电系统电压基准值设定为 12.66 kV,功率基准值设定为 10 MW,配电网线路和负荷参数见文献[19]。

3.1 三相不平衡配电网 P-V 曲线

从图 3 可以看出,b 相节点的 P-V 曲线为正常的顺时针方向,而 a、c 相的 P-V 曲线为反常的逆时

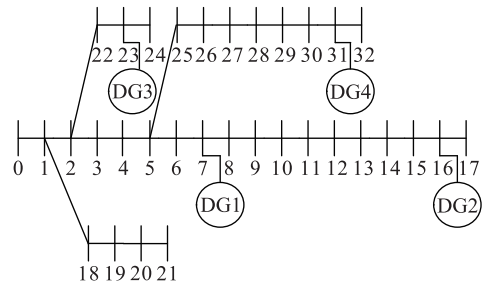


图 2 拓展的 IEEE33 节点配电系统

Fig.2 The modified IEEE33-bus distribution system

针方向。这是由于 b 相系统的供电能力最弱且承载的负荷最重,故该相最先发生节点电压或支路电流约束越限。由此可以得知,三相不平衡系统必然有某个节点的某一相的电压为薄弱相并且最容易发生节点电压或支路潮流约束越限,该相的 P-V 曲线为正常的顺时针方向;而非薄弱相的 P-V 曲线越过临界点和薄弱相越过临界点具有相反的方向。

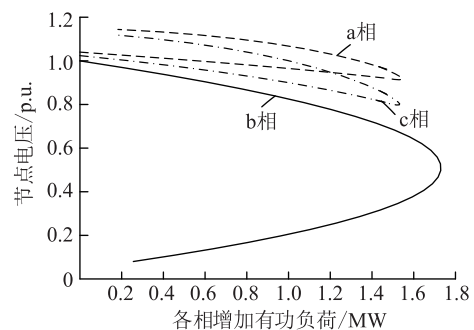


图 3 16 号节点的三相 P-V 曲线

Fig.3 Three-phase P-V curves of bus 16

3.2 含 DG 三相不平衡配电网供电能力计算

在拓展的 IEEE33 节点配电系统中接入 4 台 DG,各 DG 的接入位置和并网参数如表 1 所示。

表 1 DG 接入位置和并网参数

Table 1 Grid-connection location and parameters of DGs

编号	类型	三相参数/p.u.	接入位置
DG1	PV	$P=0.03, V=0.98, I_{\max}=1.2$	节点 7
DG2	PQ	$P=0.03, Q=0.015, I_{\max}=0.05$	节点 16
DG3	PV	$P=0.03, V=1, I_{\max}=0.762$	节点 23
DG4	PQ	$P=0.03, Q=0.025, I_{\max}=0.081$	节点 31

当配电网中只有 16 号节点接入 DG1 时,假设 16 号节点的负荷以恒功率因数增长,其他节点的负荷保持不变。当分布式电源有功出力达到最大值时,所增功率由 0 号平衡节点承担。绘制 16 号节点的三相 P-V 曲线如图 4 所示。

对比图 3 和图 4 得知,DG 接入配电网后,配电网负荷参数为 1.090 4,最大供电负荷由 25.153 MW

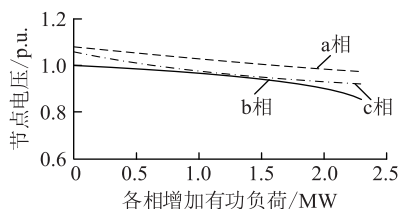


图4 DG1接入16号节点的三相P-V曲线

Fig.4 Three-phase P-V curves of bus 16 with DG1

提升到27.426 MW。但随着DG无功注入的不断增加,16号节点b相开始出现节点电压约束越限。

分析4台DG同时接入配电网后对最大供电能力的影响,其中DG2、DG3、DG4为可控DG,且 $Q_{Gi} = 0.5Q_{Gi,max}$ 。选择7、16、23和31号节点为4台DG接入配电网的节点集合,同时令4台DG的有功出力同步增长,此时16号节点的三相P-V曲线如图5所示。

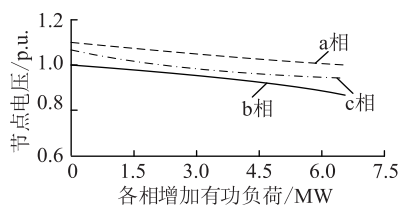


图5 不同类型DG接入后16号节点的三相P-V曲线

Fig.5 Three-phase P-V curves of bus 16 with different DGs

由图3和图5得知,不同类型DG接入配电网后,配电网负荷参数为1.2682,最大供电负荷由25.153 MW提升到31.899 MW。但随着DG无功注入不断增加,31号节点c相开始出现节点电压约束越限。由图4和图5得知,在配电网有功功率一定的情况下,由于不同类型DG接入配电网以及输出有功和无功功率,降低了配电网中线路上功率的流动,也提高了配电网中各节点电压的支撑作用,进而大幅度地提高三相不平衡配电网最大供电负荷。

4 结语

针对配电网三相负荷、线路参数不对称的特点和大量非全相运行的DG大量接入的现状,提出了含DG三相不平衡配电网供电能力评估模型,该模型以配电网最大供电负荷为目标函数,考虑三相潮流平衡方程、节点电压、支路电流和变压器容量等静态约束条件,并采用预测-校正过程的连续潮流法进行求解。通过仿真计算结果可知,连续潮流法可以求解含DG三相不平衡配电网供电能力评估问题。与此同时,在配电网线路功率一定的情况下,由于不同类型DG接入配电网提供有功和无功功

率,对配电网潮流结果产生了影响,进而影响了配电网最大供电能力。

参考文献:

- [1] 李振坤,陈星莺,刘皓明,等. 配电网供电能力的实时评估分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(6):36-40.
LI Zhenkun, CHEN Xingying, LIU Haoming, et al. Online assessment of distribution network loading capability[J]. Automation of Electric Power System,2009,33(6):36-40.
- [2] GARVER L, VAN HORNE P R, WIRGAU K A. Load supplying capability of generation-transmission networks [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(3): 957-962.
- [3] 邱丽萍,范明天. 城市电网最大供电能力评价算法 [J]. 电网技术, 2006, 30(9): 68-71.
QIU Liping, FAN Mingtian. A new algorithm to evaluate maximum power supply capability of urban distribution network [J]. Power System Technology,2006,30(9):68-71.
- [4] 束洪春,胡泽江,刘宗兵. 城市电网最大供电能力在线评估方法及其应用[J]. 电网技术,2008,32(9):46-50.
SHU Hongchun, HU Zejiang, LIU Zongbing. Online evaluation of utmost power supply ability of urban power system and its application [J]. Power System Technology,2008,32(9):46-50.
- [5] 曹文远,韩民晓,谢文强,等. 城市配网改造下中压直流配电网的供电能力分析[J]. 现代电力,2018,35(2):56-63.
CAO Wenyuan, HAN Minxiao, XIE Wenqiang, et al. Research on the power supply capability of medium voltage DC distribution network in urban distribution network transformation [J]. Modern Electric Power,2018,35(2):56-63.
- [6] 李红军,李敬如,杨卫红. 基于信赖域法的城市电网供电能力充裕度评估[J]. 电网技术,2010,34(8):92-96.
LI Hongjun, LI Jingru, YANG Weihong. Assessment of urban power network power supply capability by trust region method [J]. Power System Technology,2010,34(8):92-96.
- [7] 乐文海,何春林,郑正仙,等. 国内电动汽车充换电设施标准体系[J]. 浙江电力,2017,36(3):5-8.
LE Wenhai, HE Chunlin, ZHENG Zhengxian, et al. Domestic standard system for electric vehicle charging and battery-swapping facilities [J]. Zhejiang Electric Power,2017,36(3):5-8.
- [8] 韩霄汉,胡小寒,姚力,等. 竞争性电力市场背景下电能计量发展趋势的思考[J]. 浙江电力,2017,36(3):30-33.
HAN Xiaohan, HU Xiaohan, YAO Li, et al. Reflection on development trend of electric energy metering in competitive electricity market [J]. Zhejiang Electric Power,2017,36(3):30-33.
- [9] 贺春,陈卓,冯瑾涛,等. 电动汽车充电安全分析与解决方案 [J]. 供用电,2017,34(1):12-18,50.
HE Chun, CHEN Zhuo, FENG Jintao, et al. Analysis and solution on the safety of electric vehicle charging [J]. Distribution & Utilization,2017,34(1):12-18,50.
- [10] 吾喻明,钱立军,江明. 基于互联互通的电动汽车充电设施标准优化设计[J]. 供用电,2017,34(1):8-11.

- WU Yuming, QIAN Lijun, JIANG Ming. Standard optimization design of electric vehicle charging infrastructure based on interconnection[J]. *Distribution & Utilization*, 2017, 34(1): 8-11.
- [11] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于有功-无功协调优化的主动配电网过电压预防控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(9): 184-191.
- LIU Yinbing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Overvoltage preventive control method based on active and reactive power coordinated optimization in active distribution network [J]. *Automation of Electric Power System*, 2014, 38(9): 184-191.
- [12] 丁明, 郭学风. 含多种分布式电源的弱环配电网三相潮流计算[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(13): 35-40.
- DING Ming, GUO Xuefeng. Three-phase power flow for the weakly meshed distribution network with the distributed generation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(13): 35-40.
- [13] 王守相, 黄丽娟, 王成山, 等. 分布式发电系统的不平衡三相潮流计算[J]. *电力自动化设备*, 2007, 27(8): 11-15.
- WANG Shouxiang, HUANG Lijuan, WANG Chenshan, et al. Unbalanced three-phase power flow calculation for distribution power generation system [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2007, 27(8): 11-15.
- [14] COLEMAN N S, MIU K N. Distribution load capability with nodal power factor constraints [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(4): 3120-3126.
- [15] 赵晋泉, 范晓龙, 高宗和, 等. 含分布式电源的三相不平衡配电网连续潮流计算[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 48-53.
- ZHAO Jinquan, FAN Xiaolong, GAO Zonghe, et al. Continuation power flow calculation for unbalanced three-phase distribution networks with distributed generators [J]. *Automation of Electric Power System*, 2015, 39(9): 48-53.
- [16] 董晓明, 梁军, 韩学山, 等. 连续潮流参数选择及步长控制的分析与改进[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(13): 49-54.
- DONG Xiaoming, LIANG Jun, HAN Xueshan, et al. Analysis and improvement on parameter selection strategy and step size controlling in continuation power flow [J]. *Automation of Electric Power System*, 2011, 35(13): 49-54.
- [17] 杨杉, 同向前. 考虑分布式电源限流作用的主动配电网连续潮流计算[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(10): 57-62.
- YANG Shan, TONG Xiangqian. Continuous power flow calculation for active distribution network with consideration of current limitation of distributed generation [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(10): 57-62.
- [18] 王振浩, 由作宇, 黄亚磊, 等. 基于连续潮流法的含双端VSC-HVDC交直流系统负荷裕度分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(6): 9-15.
- WANG Zhenhao, YOU Zuoyu, HUANG Yalei, et al. Load margin analysis of hybrid AC/DC system with two terminal VSC-HVDC using continuous power flow method [J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(6): 9-15.
- [19] 车仁飞, 李仁俊. 一种少环配电网三相潮流计算新方法[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(1): 74-79.
- CHE Renfei, LI Renjun. A new three-phase power flow method for weakly meshed distribution systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(1): 74-79.

作者简介:



黄兵

黄兵(1991),男,硕士在读,研究方向为电力系统优化运行与控制(E-mail: huangbing1248@163.com);

赵晋泉(1972),男,博士,教授,研究方向为电力系统优化运行、电压稳定分析与控制、电力市场。

Power supply capability evaluation of distribution network based on continuation power flow

HUANG Bing, ZHAO Jinquan

(Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education (Hohai University), Nanjing 210098, China)

Abstract: The extensive penetration of open-phase running distributed generators such as photovoltaic generators to distribution systems may lead to a serious three-phase unbalanced condition, which is an intrinsic characteristic of distribution systems. The effect of the traditional evaluation of the power supply capability for distribution network is poor without considering the unbalanced problem. In order to accurately analyze the influence of unbalanced three-phase characteristics on the power supply capability for distribution network, the evaluation model of power supply capability for unbalanced three-phase distribution network with distributed generators is proposed, which takes the maximum load parameter of the distribution network as the objective function, considers the state variables such as branch thermal constraints and nodal voltage, and the control variables such as active and reactive power of the distribution power supply. The phase with the most serious voltage sag is selected as the continuous parameter to ensure the continuation power flow algorithm of prediction and correction is accurate. Finally, the simulation result of the modified IEEE 33-bus three-phase test system shows that the proposed model and method are effective.

Keywords: power supply capability; three-phase unbalance; distribution network; continuation power flow; distribution generator

(编辑 钱悦)