

基于动态一致性的分布式微源并联控制方法

颜湘武,王月茹,王星海,曲伟

(华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003)

摘要: 受线路阻抗、本地负荷等因素影响,传统下垂控制方法难以实现并联微源输出功率的合理分配。针对微电网孤岛运行模式下的无功功率分配问题,提出一种基于动态一致性的分布式控制方法,利用低带宽通信方式实现相邻微源间信息的交换,各微源利用其本地信息与相邻微源的信息通过动态一致性协议对微电网中无功功率的均值进行估计,再利用积分器的作用自适应调节无功-电压下垂特性曲线的电压偏置,保证并联微源输出的无功功率按照容量比分配。对微电网孤岛模式下不同的运行工况进行仿真与对比分析,验证了所提控制策略的正确性和有效性。

关键词: 微电网; 分布式微源; 功率分配; 动态一致性; 分布式控制; 自适应; 通信

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.003

0 引言

近年来,分布式发电 DG (Distributed Generation) 技术受到了广泛关注^[1-3],作为一种经典的多逆变器并联控制方法,下垂控制在微电网中获得了越来越多的应用^[4-5],如何实现微源之间输出功率的合理分配是微电网稳定运行的关键^[6]。

微电网孤岛运行时,各微源主要采用分散控制方式依据本地信息进行控制,但受到线路阻抗、本地负荷等的影响,微源输出的功率难以实现合理分配,虚拟阻抗法^[7-8]、补偿法^[9]、下垂系数调整法^[10]为几种常用的并联功率分配控制方法。虚拟阻抗法^[7-8]可以改善微源间的功率分配,但加入较大的虚拟阻抗会影响电压质量;补偿法^[9]通过补偿微源等效输出阻抗与线路阻抗压降的方式来实现功率的合理分配,同时可以提高母线电压质量,但阻抗测量精度会直接影响补偿效果;下垂系数调整法^[10]通过将下垂增益取为功率的一次函数来改善功率分配情况,但该方法并不能实现功率的精确分配,只能起到一定程度的改善作用。

文献[7-10]的并联功率分配控制方法鲁棒性能差,针对这一问题,文献[11]提出了一种并联功率鲁棒控制方法,通过在无功-电压控制环节中增加积分器来实现功率的精确分配,但该方法中每台微源的本地控制器都需要精确获取公共耦合点 PCC (Point

of Common Coupling) 的电压幅值,由于微源地理位置上的分散性,微电网的拓扑结构较为复杂,可能存在多个 PCC,此时该方法无法实现微电网功率的合理分配。文献[12-14]利用微电网中央控制器 MGCC (MicroGrid Central Controller) 与低带宽通信的方式实现了并联微源的自适应功率分配控制, MGCC 向各微源发送功率给定值,再通过积分环节使各微源输出的功率等于其给定值,进而实现微电网功率的合理分配,但该方法对 MGCC 的可靠性要求高,一旦 MGCC 故障,微电网功率的合理分配将失去保障。

针对上述问题,本文提出了一种微电网孤岛运行模式下的无功功率分配控制方法,该方法采用了分布式控制方式,不需要 MGCC,各微源仅需其本地信息与相邻微源的信息,利用动态一致性协议对微电网的无功功率均值进行估计,并通过积分器实现功率的自适应控制,进而实现无功功率在并联微源之间的合理分配。

1 基于 MGCC 的自适应下垂控制方法

1.1 下垂控制原理

图 1 为简化的 2 台分布式电源并联模型。逆变器 $i (i=1, 2)$ 可以等效为电压源 $E_i \angle \delta_i$, 在逆变器出口处串联电抗器 jX_{gi} 使其等效输出阻抗呈感性, 母线 i 处的电压为 $U_i \angle \theta_i$, P_i, Q_i 分别为逆变器 i 输出的

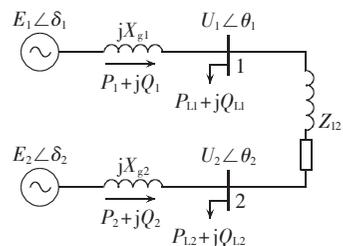


图 1 并联微源简化模型

Fig.1 Simplified model of parallel micro-sources

收稿日期:2016-04-08;修回日期:2017-01-10
基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2015A-A050603);河北省自然科学基金资助项目(E2015502046);国家电网公司科学技术项目(SGTYHT/14-JS-188)
Project supported by the National High-Tech R&D Program of China (863 Program) (2015AA050603), the Natural Science Foundation of Hebei(E2015502046) and the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(SGTYHT/14-JS-188)

有功、无功功率, P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为其本地负荷的有功、无功功率, 两逆变器经线路阻抗 Z_{l2} 后并联。

由图 1 可得逆变器 i 的输出功率为:

$$\begin{cases} P_i = \frac{E_i U_i \sin(\delta_i - \theta_i)}{X_{gi}} \\ Q_i = \frac{E_i [E_i - U_i \cos(\delta_i - \theta_i)]}{X_{gi}} \end{cases} \quad (1)$$

功角差 $\delta_i - \theta_i$ 一般较小, 可近似处理为 $\sin(\delta_i - \theta_i) \approx \delta_i - \theta_i$ 、 $\cos(\delta_i - \theta_i) \approx 1$, 故式(1)可简化为:

$$\begin{cases} P_i \approx \frac{E_i U_i (\delta_i - \theta_i)}{X_{gi}} \\ Q_i \approx \frac{E_i (E_i - U_i)}{X_{gi}} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)易知, 可以通过调节相角差与电压差来实现逆变器输出有功和无功功率的调节, 而相角差的控制可以通过调节频率来实现, 故传统下垂控制方程式为:

$$\begin{cases} f_i = f_0 - m_i P_i \\ E_i = E_0 - n_i Q_i \end{cases} \quad (3)$$

其中, E_0 、 f_0 分别为空载时逆变器的输出电压和频率; E_i 、 f_i 分别为其输出功率为 $P_i + jQ_i$ 时的电压与频率; m_i 、 n_i 为下垂增益。

传统的有功-频率、无功-电压下垂控制中, 由于频率为全局变量, 稳态时系统频率处处相等, 故并联微源可以按照容量比输出有功功率。但受微电网线路阻抗特性、本地负荷、拓扑结构等因素影响^[15], 微源输出的无功功率难以保证按容量比分配。

1.2 自适应下垂控制

针对传统下垂控制无法保证并联微源合理分担负荷功率的问题, 文献[12-14]提出了自适应功率分配方法。文献[12-13]针对无功-电压下垂控制中的无功功率分配问题, 提出利用低带宽通信将各微源的无功功率信息发送给 MGCC, 由 MGCC 根据各微源的额定容量比计算出每台微源的无功功率给定值, 通过增加积分环节调节无功-电压下垂特性曲线的电压偏置, 使得微源输出的无功功率等于其给定值, 从而实现了无功功率的合理分配。文献[14]针对线路阻抗为阻性条件下的有功-电压下垂控制中的有功功率分配问题, 提出了类似的控制方法, 其区别在于积分环节的输出用于调节下垂增益, 该方法同样可以实现功率的合理分配。

文献[12-14]的功率分配方法不受线路阻抗、本地负荷等的影响, 鲁棒性强。图 2 给出了感性阻抗条件下的自适应无功功率分配下垂控制框图。图中, Q_{refi} 为 MGCC 发送给逆变器 i 的无功功率给定, k_{ii} 为积分系数。

图 2 中, 积分器的输出用于调节电压偏置, 其相应的下垂控制方程如式(4)所示。

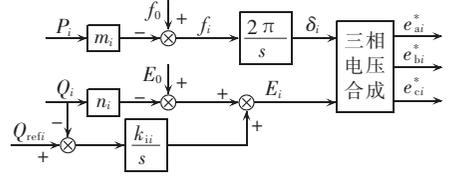


图 2 自适应无功功率分配下垂控制框图

Fig.2 Block diagram of droop control with adaptive reactive-power allocation

$$\begin{cases} f_i = f_0 - m_i P_i \\ E_i = E_0 - n_i Q_i + \frac{k_{ii}}{s} (Q_{refi} - Q_i) \end{cases} \quad (4)$$

2 基于动态一致性的无功功率分配方法

文献[12-14]提出的自适应功率分配方法具有分配精度高、鲁棒性强等优点, 但该方法对 MGCC 的可靠性要求高, MGCC 故障后并联微源的功率难以实现合理分配。针对这一问题, 本文选取了微电网的分布式控制方式, 采用了基于动态一致性协议的无功功率均值估计方法, 避免了 MGCC, 同时实现了并联微源无功功率的合理分配。

2.1 分布式控制方法与图论基础

微电网目前存在 3 种控制方式: 分散式控制、集中式控制与分布式控制。分散式控制难以有效协调各微源间的关系; 集中式控制依赖于 MGCC, 可靠性低^[15]; 而分布式控制方式不需要 MGCC, 每个微源的控制单元仅需要其本地信息与相邻微源的信息, 既可以实现各微源的协调控制, 同时又提高了系统的可靠性。

分布式控制方式中, 相邻微源之间存在通信连接, 微电网中形成了一个稀疏的通信网络, 可以用代数图论知识加以描述。

有 N 个节点的有向图可以用 $G(v, \varepsilon, A)$ 来表示, 其中包含了节点集 $v = \{1, 2, \dots, N\}$ 、有向边集 $\varepsilon \subseteq v \times v$ 和邻接矩阵 $A = (a_{ij})_{N \times N}$ 。如果节点 i 可以直接向节点 j 传递信息, 记作 $(i, j) \in \varepsilon$ 且 $a_{ji} = 1$, 否则 $a_{ji} = 0$ 。节点 i 的邻居集合为 $N_i = \{j \mid (j, i) \in \varepsilon\}$, 入度矩阵为 $D^{\text{in}} = \text{diag}(d_i^{\text{in}})$, 出度矩阵为 $D^{\text{out}} = \text{diag}(d_i^{\text{out}})$, 其中 $d_i^{\text{in}} = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$, $d_i^{\text{out}} = \sum_{i \in N_j} a_{ji}$ 。定义拉普拉斯矩阵为 $L = D^{\text{in}} - A$, 如果满足 $D^{\text{in}} = D^{\text{out}}$, 则拉普拉斯矩阵平衡。如果图 G 中的任意 2 个节点都能够通过边集中的有向路径连接起来, 则称该图为连通图。根节点是指以该节点作为起点, 与其他任意节点之间至少存在一条有向路径, 包含根节点的有向图也被称为含有生成树。

2.2 动态一致性协议

由多节点组成的分布式网络中, 一致性是指所有的节点通过信息交换与融合最终都达到一致。本文提出了基于动态一致性协议的无功功率均值估计

方法,具体如式(5)所示。

$$\bar{Q}_i^*(t) = Q_i^*(t) + \int_0^t \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\bar{Q}_j^*(\tau) - \bar{Q}_i^*(\tau)) d\tau \quad (5)$$

其中, \bar{Q}_i^* 、 \bar{Q}_j^* 分别为节点 i 、 j 的控制单元对标么化的无功功率均值的估计; Q_i^* 为节点 i 的无功功率标么值。

式(5)中,测量值 Q_i^* 的变化会直接影响其本地估计值 \bar{Q}_i^* ,而估计值 \bar{Q}_i^* 的改变会经由通信网络间接影响到其他节点的估计值。规定 $\mathbf{Q}^* = [Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_N^*]^T$ 与 $\bar{\mathbf{Q}}^* = [\bar{Q}_1^*, \bar{Q}_2^*, \dots, \bar{Q}_N^*]^T$ 分别为无功功率标么值的测量值与估计值向量,由文献[16]可知,上述动态一致性协议的全局响应特性可以由式(6)描述。

$$\bar{\mathbf{Q}}^* = s(\mathbf{I}_N + \mathbf{L})^{-1} \mathbf{Q}^* \quad (6)$$

其中, \mathbf{I}_N 为 $N \times N$ 阶的单位矩阵。

根据文献[16]可知,当通信网络包含生成树且拉普拉斯矩阵平衡时, $\bar{\mathbf{Q}}^*$ 的所有元素会收敛于微电网标么化的无功均值,即对任意节点 i 式(7)成立。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{Q}_i^*(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Q_j^*(t) \quad (7)$$

从而,下垂方程式可调整为:

$$\begin{cases} f_i = f_0 - m_i P_i \\ E_i = E_0 - n_i Q_i + \frac{k_{ii}}{s} (\bar{Q}_i^* Q_{Ni} - Q_i) \end{cases} \quad (8)$$

其中, Q_{Ni} 为微源 i 的额定无功功率值。

式(8)中, $\bar{Q}_i^* Q_{Ni}$ 作为微源 i 的无功给定值,同时也是稳态时微源 i 实际输出的无功功率,动态一致性协议保证了其全局收敛性,故并联微源稳态情况下的无功功率可以实现比例分配。

3 仿真分析

以图 3 所示 380 V/50 Hz 孤岛运行的微电网为例验证本文所提控制策略的正确性。

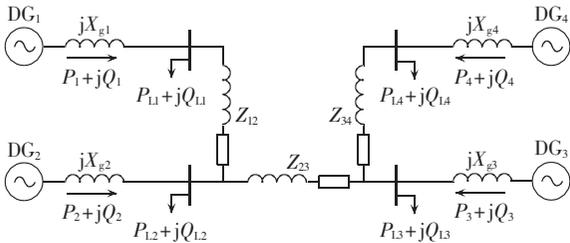


图 3 微电网仿真系统简化模型

Fig.3 Simplified model of microgrid system for simulation

该系统共有 4 台逆变器并联, DG_1 — DG_4 的额定有功功率为 $P_{N1} = P_{N2} = 10 \text{ kW}$ 、 $P_{N3} = P_{N4} = 5 \text{ kW}$,额定无功功率为 $Q_{N1} = Q_{N2} = 4 \text{ kvar}$ 、 $Q_{N3} = Q_{N4} = 2 \text{ kvar}$,等效输出电抗为 $X_{g1} = X_{g2} = X_{g3} = X_{g4} = 0.628 \Omega$ 。负荷参数为: $P_{L1} = 5 \text{ kW}$ 、 $P_{L2} = 7 \text{ kW}$ 、 $P_{L3} = 4 \text{ kW}$ 、 $P_{L4} = 2 \text{ kW}$ 、 $Q_{L1} = Q_{L2} = Q_{L4} = 1 \text{ kvar}$ 、 $Q_{L3} = 1.5 \text{ kvar}$ 。线路阻抗参数为: $Z_{12} = 0.6 +$

$j0.8 \Omega$ 、 $Z_{23} = 0.3 + j0.5 \Omega$ 、 $Z_{34} = 0.7 + j0.5 \Omega$ 。

为了使逆变器可以按照容量比输出功率,下垂系数的设置满足与容量成反比,有功-频率下垂增益为 $m_1 = m_2 = 5 \times 10^{-5}$ 、 $m_3 = m_4 = 1 \times 10^{-4}$,无功-电压下垂增益为 $n_1 = n_2 = 2.2 \times 10^{-3}$ 、 $n_3 = n_4 = 4.4 \times 10^{-3}$,且传统下垂控制与本文所提出的控制策略中的下垂系数相同。自适应无功分配控制方法的积分系数均为 0.1,即 $k_{i1} = k_{i2} = k_{i3} = k_{i4} = 0.1$ 。

本文采用了图 4 所示的环形双向通信网络,以保证单一通信线路或微源故障时通信拓扑图仍满足包含生成树且拉普拉斯矩阵平衡的条件,图 4 所对应的邻接矩阵如式(9)所示。

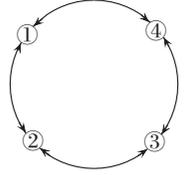


图 4 通信网络拓扑
Fig.4 Topology of communication network

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

为了验证本文所提控制方法的正确性,利用 MATLAB/Simulink 搭建了仿真模型,并给出了 4 种工况下的仿真结果,4 种工况的仿真条件具体如下。

工况 1:仿真时间为 3 s,0~1 s 采用传统下垂控制,即微源之间没有通信,1 s 后切换为本文提出的控制策略,2 s 时 DG_1 处突增 4 kW、1 kvar 本地负荷。

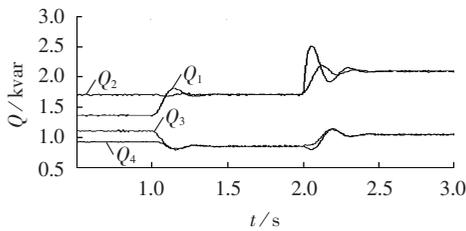
工况 2:在工况 1 条件设置的基础上,考虑了通信延时的问题,分别设置通信延时为 1 ms、10 ms、50 ms。

工况 3:在工况 1 条件设置的基础上,考虑了单一通信线路故障的问题,设置 1.6 s 时 DG_3 与 DG_4 间的通信线路故障,即两微源间不再有信息交换。

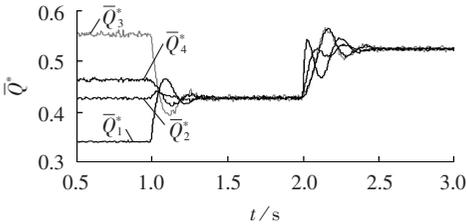
工况 4:该工况下仿真时间为 3.5 s,考虑了单台微源故障的情况,1.5 s 时 DG_4 故障被切除,与其相关的通信环节不再起作用,即 DG_1 与 DG_3 不再接收 DG_4 的信息,2.5 s 时 DG_1 处突增 4 kW、1 kvar 本地负荷。

图 5—8 依次给出了工况 1—4 的仿真结果。

图 5 中,1 s 前采用的是传统下垂控制方法,各微源输出的无功功率不满足与容量成比例,由于此时微源间并没有通信,各微源对无功功率均值的估计即为其自身输出的无功功率;1 s 后,切换为本文提出的控制方法,经过短暂调节后,图 5(a)中无功功率在微源间实现了比例分配,图 5(b)中各微源对标么化的无功功率均值的估计最终收敛于同一个值,验证了动态一致性估计方法的正确性,图 5(c)中 DG_1 的无功功率与其给定值稳态时达到了一致,验证了自适应无功分配策略的正确性;2 s 时,



(a) 无功功率



(b) 标么化的无功均值估计

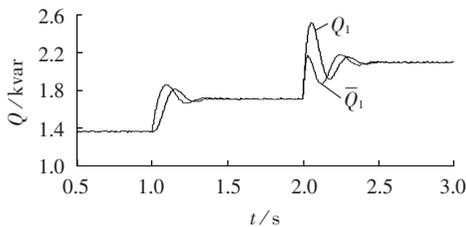
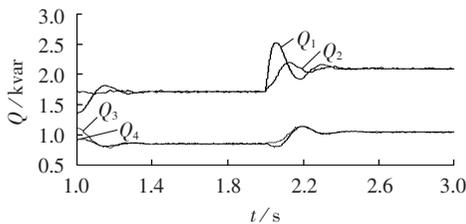
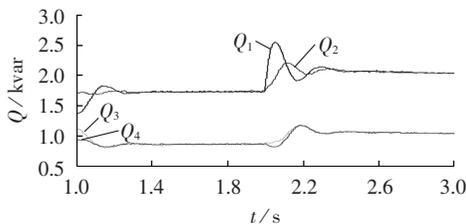
(c) DG₁ 的无功给定与实际输出

图 5 基于动态一致性的无功分配仿真结果

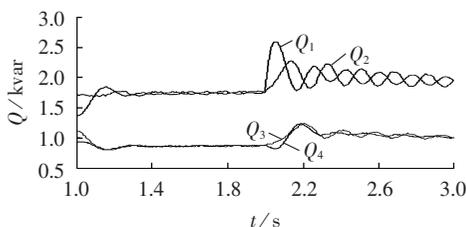
Fig.5 Simulative results of reactive-power allocation based on dynamic consistency



(a) 通信延时 1 ms



(b) 通信延时 10 ms



(c) 通信延时 50 ms

图 6 考虑通信延时的无功分配仿真结果

Fig.6 Simulative results of reactive-power allocation considering communication delay

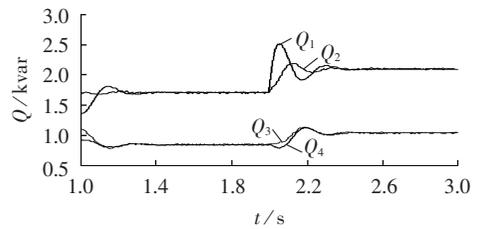


图 7 单一通信线路故障时的无功分配仿真结果

Fig.7 Simulative results of reactive-power allocation with single communication line failure

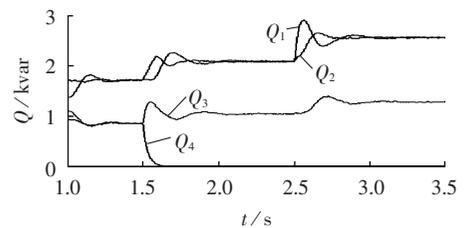


图 8 单一微源故障时的无功分配仿真结果

Fig.8 Simulative results of reactive-power allocation with single micro-source failure

DG₁ 处的本地负荷突增,由图 5 可知,经过调节后,各微源重新按比例分配了负荷功率,动态响应过程较快。

通信系统的延时无法避免,图 6(a)、(b)、(c)分别给出了通信延时为 1 ms、10 ms、50 ms 时各微源输出的无功功率仿真结果。与图 5(a)相比可以发现,通信延时为 1 ms 与 10 ms 时对无功功率分配的稳态精度与动态响应速度没有明显的影响,由于实际中会采用低截止频率的低通滤波器对瞬时功率进行滤波,本文选取低通滤波器的截止频率为 5 Hz,其时间常数近似等于 32 ms,1 ms 与 10 ms 的延时相比于低通滤波器的时间常数可以忽略,因此对系统的响应影响不大;图 6(c)中,无功功率分配的动态响应时间变长,且稳态难以保持稳定,系统表现出振荡发散的趋势,由于 50 ms 的延时已经超过了滤波器的时间常数,其影响已不可忽略。通过以上分析可知,所提控制方法在通信延时达到十几毫秒时依然可以保证较好的稳态与动态性能,因此该方法对通信的要求并不是很高,具有可实践性。

图 7 给出了 DG₃ 与 DG₄ 间的通信线路故障时的仿真结果,故障时刻为 1.6 s,此时系统处于稳态,可以看出,单一通信线路故障后,由于通信拓扑图仍保持了连通性,且拉普拉斯矩阵平衡,因此并没有影响系统的稳态特性,且 2 s 时负荷突增,系统依然具有较快的动态响应特性。

图 8 中,1.5 s 时 DG₄ 被切除,由于低通滤波器的作用,其输出功率没有立即降为 0;经过控制器调节后,DG₁—DG₃ 重新按比例承担了系统的负荷功率;2.5 s 时,DG₁ 处本地负荷突增,仿真结果表明系统依然具有良好的稳态与动态性能。

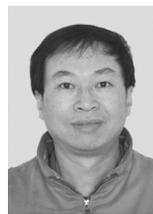
4 结论

本文针对孤岛模式下并联微源的功率分配问题,提出了一种基于动态一致性的分布式功率控制方法,实现了并联微源输出功率的合理分配。该方法利用低带宽通信方式实现了相邻微源间信息的交换,并采用了基于动态一致性协议的无功功率均值估计方法,通过增加积分器自适应调节无功-电压下垂特性曲线的电压偏置,实现了并联微源间功率的比例分配。通过设置不同工况进行仿真与对比分析,结果表明该方法鲁棒性强,功率分配精度高,具有很好的稳态与动态性能。

参考文献:

- [1] 王成山,高菲,李鹏,等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):2-8.
WANG Chengshan,GAO Fei,LI Peng,et al. Control strategy research on low voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(25):2-8.
- [2] 王成山,肖朝霞,王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(7):98-103.
WANG Chengshan,XIAO Zhaoxia,WANG Shouxiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(7):98-103.
- [3] 丁明,张颖媛,蒋美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术,2009,33(11):6-11.
DING Ming,ZHANG Yingyuan,MAO Meiqin. Key technologies for microgrids being researched[J]. Power System Technology, 2009,33(11):6-11.
- [4] 徐玉琴,马焕均. 基于改进下垂控制的逆变器并联运行技术[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(7):103-107.
XU Yuqin,MA Huanjun. Parallel operation technology of inverters based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control,2015,43(7):103-107.
- [5] 张宸宇,梅军,郑建勇,等. 一种适用于低压微网的改进型下垂控制器[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):53-59.
ZHANG Chenyu,MEI Jun,ZHENG Jianyong,et al. Improved droop controller for low-voltage microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):53-59.
- [6] 王旭斌,李鹏,窦鹏冲,等. 用于微网孤岛运行的新型功率控制方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):122-128.
WANG Xubin,LI Peng,DOU Pengchong,et al. Power control method for autonomous microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(6):122-128.
- [7] HE J W,LI Y W,GUERRERO J M,et al. An islanding microgrid power sharing approach using enhanced virtual impedance control scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(11):5272-5282.
- [8] GUERRERO J M,DE VICUNA L G,MATAS J,et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2005,52(4):1126-1135.
- [9] 杨向真,苏建徽,丁明,等. 面向多逆变器的微电网电压控制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):7-13.
YANG Xiangzhen,SU Jianhui,DING Ming,et al. Voltage control strategies for microgrid with multiple inverters[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(7):7-13.
- [10] 张尧,马皓,雷彪,等. 基于下垂特性控制的无互联逆变器并联动态性能分析[J]. 中国电机工程学报,2009,29(3):42-48.
ZHANG Yao,MA Hao,LEI Biao,et al. Analysis of dynamic performance for parallel operation of inverters without wire interconnections[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(3):42-48.
- [11] 吕志鹏,罗安. 不同容量微源逆变器并联功率鲁棒控制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(12):35-42.
LÜ Zhipeng,LUO An. Robust power control of paralleled micro-source inverters with different power ratings[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(12):35-42.
- [12] MICALLEF A,APAP M,STAINES C S,et al. Secondary control for reactive power sharing and voltage amplitude restoration in droop-controlled islanded microgrids[C]//3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems(PEDG). Aalborg,Denmark:IEEE,2012:492-498.
- [13] 刘尧,韩华,粟梅,等. 一种并联分布式微源的无功功率均分控制策略[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(2):525-533.
LIU Yao,HAN Hua,SU Mei,et al. A control strategy of reactive power sharing for parallel distributed micro-sources[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2015,46(2):525-533.
- [14] 孙孝峰,杨雅麟,赵巍,等. 微电网逆变器自适应下垂控制策略[J]. 电网技术,2014,38(9):2386-2391.
SUN Xiaofeng,YANG Yalin,ZHAO Wei,et al. An adaptive droop control method for inverters in microgrid[J]. Power System Technology,2014,38(9):2386-2391.
- [15] 李鹏,王旭斌,马剑. 基于非线性多智能体系统的微网分布式功率控制方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4277-4286.
LI Peng,WANG Xubin,MA Jian. Distributed power control method of microgrid based on nonlinear multi-agent system[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(25):4277-4286.
- [16] NASIRIAN V,MOAYEDI S,DAVOUDI A,et al. Distributed cooperative control of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2015,30(4):2288-2303.

作者简介:



颜湘武

颜湘武(1965—),男,湖南醴陵人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为新能源电力系统与微网技术、现代电力变换、新型储能与节能(**E-mail**:xiangwuy@ncepu.edu.cn);

王月茹(1991—),女,河北邢台人,硕士研究生,研究方向为新能源电力系统与微网技术(**E-mail**:wyr_ncepu@126.com);

王星海(1990—),男,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为新能源电力系统与微网技术;

曲伟(1975—),男,山西运城人,博士研究生,研究方向为电池检测技术。

(下转第66页 continued on page 66)

计法的精度要高。此外,虽然蒙特卡罗模拟法的精度比点估计法略高,但是点估计法的计算量大幅小于蒙特卡罗模拟法,而改进点估计法和传统点估计法的计算量几乎是一致的。

5 结论

点估计法在分布式电源出力不确定性对输电网风险评估上有着广泛的应用。针对输电线路过负荷的风险评估,本文提出了一种改进的点估计法,考虑了各个输入量的影响因子对权重的影响,从而改善了传统点估计法的计算精度。算例结果表明:相比于传统的点估计法,所提的改进点估计法具有计算量小、预测精度比传统点估计法精度高的特点,能够很好地用于风光互补系统中输电线路过负荷的风险评估。

参考文献:

- [1] 蔡国伟,孔令国,杨德友,等. 大规模风光互补发电系统建模与运行特性研究[J]. 电网技术,2012,36(1):65-71.
CAI Guowei,KONG Lingguo,YANG Deyou,et al. Research on modelling and operation characteristics analysis of large-scale wind & light complementary electricity-generating system[J]. Power System Technology,2012,36(1):65-71.
- [2] LIU Chunhua,CHAU K T,ZHANG Xiaodong. An efficient wind-photovoltaic hybrid generation system using doubly excited permanent-magnet brushless machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2010,57(3):831-839.
- [3] PARK S J,KANG B B,YOON J P,et al. A study on the stand-alone operating or photovoltaic/wind power hybrid generation system[C]//Proceedings of the 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Nanjing,China:IEEE,2004:1631-1634.
- [4] 康龙云,郭红霞,吴捷,等. 分布式电源及其接入电力系统时若干研究课题综述[J]. 电网技术,2010,34(11):43-47.
KANG Longyun,GUO Hongxia,WU Jie,et al. Characteristics of distributed generation system and related research issues caused by connecting it to power system[J]. Power System Technology,2010,34(11):43-47.
- [5] MILLER A C,RICE T R. Discrete approximations of probability distributions[J]. Management Science,1983,29:352-363.
- [6] HONG H P. An efficient point estimate method for probabilistic analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety,1998,59(3):261-267.
- [7] MORALES J M,PEREZ-RUIZ J. Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,4(22):1594-1601.
- [8] 吴蓓,张焰,陈闽江. 点估计法在电压稳定性分析中的应用[J]. 中国电机工程学报,2008,28(25):38-43.
WU Bei,ZHANG Yan,CHEN Minjiang. Application of point estimate method to voltage stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(25):38-43.
- [9] 芦晶晶,赵渊,赵勇帅,等. 含分布式电源配电网可靠性评估的点估计法[J]. 电网技术,2013,37(8):2250-2257.
LU Jingjing,ZHAO Yuan,ZHAO Yongshuai,et al. A point estimation method for reliability evaluation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology,2013,37(8):2250-2257.
- [10] 杨秀媛,黄丹,申洪. 多能源互补独立电力系统的控制策略仿真研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):156-162.
YANG Xiuyuan,HUANG Dan,SHEN Hong. Research on control strategy of multi-energy complementary isolated power system[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(4):156-162.
- [11] 徐林,阮新波,张步涵,等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):88-98.
XU Lin,RUAN Xinbo,ZHANG Buhuan,et al. An improved optimal sizing method for wind-solar hybrid power system[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):88-98.
- [12] SU C L. Probabilistic load-flow computation using point estimate method[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2005,20(4):1843-1851.
- [13] VERBIC G,CANIZARES C A. Probabilistic optimal power flow in electricity markets based on a two-point estimate method[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(4):1883-1893.
- [14] USAOLA J. Probabilistic load flow with correlated wind power injections[J]. Electric Power Systems Research,2010,80(5):528-536.
- [15] LI Xue,ZHANG Xiong,WU Lei,et al. Transmission line overload risk assessment for power systems with wind and load-power generation correlation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2015,6(3):1233-1242.
- [16] 王增平,戴志辉. 含风力发电的配网电流保护运行风险评估[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):7-12.
WANG Zengping,DAI Zhihui. Operation risk assessment for current protection of distribution network with wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):7-12.
- [17] 刘健,韩磊,张志华. 面向用户并考虑紧迫性的配电网运行风险评估[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):97-102,109.
LIU Jian,HAN Lei,ZHANG Zhihua. Power system reliability analysis considering substation interior[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):97-102,109.
- [18] LI X,PEI J X,ZHANG S H. A probabilistic wind farm model for probabilistic load flow calculation [C]//Power & Energy Engineering Conference. Chengdu,China:[s.n.],2010:1-4.
- [19] 冯士刚,艾芊. 利用强度 Pareto 进化算法的多目标无功优化[J]. 高电压技术,2007,33(9):115-119.
FENG Shigang,AI Qian. Multi-objective reactive power optimization using SPEA2[J]. High Voltage Engineering,2007,33(9):115-119.

作者简介:



雷加智

雷加智(1988—),男,湖北大冶人,博士研究生,研究方向为电力系统风险评估(**E-mail**: leijiazi@126.com);

龚庆武(1967—),男,湖南新邵人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统分析、稳定和控制等(**E-mail**: qwgong@whu.edu.cn)。

(下转第 81 页 continued on page 81)