基于博弈论控制方法的无互联线直流微电网发电系统

冬 雷,黄晓江,肖辅荣,吴明轩,廖晓钟 (北京理工大学 自动化学院,北京 100081)

摘要:提出了一种基于博弈论的控制策略,应用于无互联线直流微电网中的分布式发电装置,实现并联均 流的控制。该方法通过引入虚拟对手的概念,每台分布式发电装置根据自身的成本函数和其他发电装置之 间通过博弈共同对直流母线电压进行控制,进而使直流母线电压和各分布式发电装置的输出电流最终达到纳什 均衡。所给出的成本函数综合了分布式发电装置的输出功率、历史直流母线电压误差和当前直流母线电压 误差。通过小信号建模分析了系统的动态稳定性。仿真和实验结果证明了该控制策略的有效性,各个分布 式发电装置能够实现功率均分。

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.08.006

0 引言

目前分布式发电系统作为新能源领域的主要供 电形式已经逐渐受到广泛的重视。由于风能和太阳 能发电普遍存在不稳定以及难以准确预测的特性. 所以在微电网中发电装置的"即插即用"功能显得尤 为重要[1-2]。目前分布式发电系统中以及多变换器并 联系统中的控制方法主要有两大类[34]:一类是采用 基于互联线的控制方法,如主从法、功率均分控制法、 电流权重控制法等,但互联线的存在不仅限制各个 并联发电装置的位置,还会引入很多干扰噪声,导致 系统的可靠性降低,同时会限制微电网中不同类型 的分布式电源的"即插即用"功能;另一类为无互联 线并联技术,无互联线并联系统中由于不存在互联 线,所有分布式发电装置都只能检测到自己的输出 信息而无法得知其他分布式发电装置的信息,此类 系统一般采用下垂法进行控制[5-9],然而下垂控制方 法对整个系统的稳定性会产生较大的负面影响,而 且会增大系统电压的变化范围[10-12]。

为了克服带互联线分布式发电系统以及下垂控 制所带来的一些问题,本文提出了基于博弈论的控 制策略,使得多个分布式发电装置通过相互博弈达 到纳什均衡状态,同时满足直流微电网的电压稳定 性要求和发电装置的功率均分要求。最后文中对该 控制方法进行了分析和实验验证。

微电网中分布式发电装置的博弈论控制 策略

如图 1 所示,直流微电网采用太阳能电池供电, 太阳能电池经过 Buck 变换器向直流母线和负载供 电,所有分布式发电装置只通过直流母线相互连接, 没有互联的通信线路。所有分布式发电装置的控制

收稿日期:2013-10-11;修回日期:2014-06-19



图 1 太阳能电池供电的直流微电网

Fig.1 DC microgird powered by solar cells

是一种非合作博弈,各个独立控制的分布式发电装置 分别向直流母线供电,共同提供负荷所需要的功率, 同时控制分布式发电装置使直流母线电压稳定在设 定值。所有博弈参与者的行为是完全理性的,即博弈 过程中的行为主体始终以自身最大利益为目标,具 有在确定和不确定环境中追求自身利益最大化的判 断和决策能力^[13]。因此直流母线电压是由所有分布 式发电装置的控制策略所共同决定。每个分布式发 电装置的控制策略均会影响其他装置的控制策略。 在所有发电装置相互博弈的情况下,整个系统达到纳 什均衡需满足以下条件^[14]:每个独立的分布式发电 装置的发电策略是最优的,且能最小化其成本函数; 所有的最优控制策略能使直流母线电压保持稳定。

当达到纳什均衡时,没有参与者会去主动改变 其策略,因为一旦参与者改变控制策略,其成本函 数会增加,故所有参与者都维持自己的策略不变,即 整个系统达到一个稳定的状态。

$$J_j(d_j^*; d^{-j}) \leq J_j(d_j; d^{-j}) \tag{1}$$

其中,d^{*}_j(j=1,2,…,N)为分布式发电装置j达到纳什 均衡状态时的发电控制策略;J_i为分布式发电装置j 的成本; d_j 为分布式发电装置j处于非纳什均衡状态时的发电控制策略,所有的 $d_j \in (0,1)$,且 $j=1,2,\cdots$, $N;d^{-j}$ 为除分布式发电装置j外的其他分布式发电装置的发电控制策略。

这种控制方法通过采用纳什均衡理论,使每个 分布式发电装置根据本地信息产生控制策略使得成 本函数值最小,此算法与整个微电网中的分布式发 电装置的个数无关。

假设微电网中有 N 个分布式发电装置共同提供 电能,对每个分布式发电装置而言就有 N-1 个竞争对 手。因为没有通信线路,所以每个分布式发电装置无 法了解竞争对手的个数和其他任何信息。为此引入 虚拟对手的概念,即将除自身以外的其他分布式发 电装置视为一个等效的虚拟竞争对手。其他任意 1 个或几个发电装置修改控制策略,可以视同该虚拟 发电装置修改了自身的控制策略。采用虚拟对手的 方法能够把 N 个参与者的博弈问题简化成 2 个参与 者的博弈问题,可以大幅简化博弈问题的复杂性^[15]。

如图 1 所示,由 N 个太阳能电池阵列通过变换器 向直流母线供电,并采用超级电容作为系统的储能装置。 $i_{\mu}(j=1,2,\cdots,N)$ 表示第j 个分布式发电装置 t 时刻的输出电流,因此可以得到:

$$i_{1l} + i_{2l} + \dots + i_{Nl} = i_{Cl} + i_{ol}$$
 (2)

其中,*i*_{ci}为储能设备的充电电流;*i*_{oi}为负载电流。*i*_{ci}大于0时,超级电容为充电状态,反之为放电状态, 在这2种状态下,均可以得到:

$$\sum_{j=1}^{N} i_{jt} = C \frac{\mathrm{d}u_{ot}}{\mathrm{d}t} + \frac{u_{ot}}{R}$$
(3)

直流母线电压能够由式(4)得到:

$$u_{ot} = f\left(\sum_{j=1}^{N} i_j\right) \tag{4}$$

$$u_{jl} = u_{ol} + \varepsilon_{jl} \tag{5}$$

其中, u_{ji} 为第j个发布式发电装置检测到的t时刻的 直流母线电压; ϵ_{ji} 为分布式发电装置电压传感器的 检测误差。

由式(4)可知直流母线电压由各个并联电流源 所共同决定。为了使参与博弈的发电装置能达到纳 什均衡状态,定义分布式发电装置j的成本函数如下: $J_{i}(u,i) = A u_{i} \Delta i_{i} +$

$$B\sum_{m=0}^{t} (k_{j1}u_{r} - k_{j2}u_{jm} - k_{j3}i_{jm})^{2} + E(u_{r} - u_{jt})^{2}$$
(6)

其中, $A \, _{,B} \, _{,E} \, _{,k_{j1}} \, _{,k_{j2}} \, _{,k_{j3}}$ 均为非负常量; $u \, _{,i}$ 分别为各 个分布式发电装置检测的直流母线电压及该分布式 发电装置自身的输出电流; u_{r} 为直流母线电压设定 值; $A \, u_{ji} \, \Delta i_{ji}$ 为博弈成本, $\Delta i_{ji} \,$ 为 $t \,$ 到t + 1时刻的电流 变化量,可为正值或负值,当 $A \, u_{ji} \, \Delta i_{ji}$ 为正时分布式 发电装置的输出功率增加,当 $A \, u_{ji} \, \Delta i_{ji}$ 为负时分布式 发电装置的输出功率减小,但整个成本函数需综合考 虑 $A \, u_{ji} \, \Delta i_{ji}$ 和后 2 项,使每个分布式发电装置的成本 函数 $J_{ji}(u,i)$ 最小; $B \sum_{m=0}^{t} (k_{j1} u_{r} - k_{j2} u_{jm} - k_{j3} i_{jm})^{2}$ 项作为一 个惩罚函数表示对历史时刻输出电压偏离设定值的 惩罚及对负载的补偿; $E(u_r - u_j)^2$ 代表直流母线电压 的控制误差。各个分布式发电装置通过将其成本函 数最小化, 从而得到电流的控制策略。利用求极值的 方法, 得到分布式发电装置的输出电流参考值为:

$$i_{jr(t+1)} = i_{jrt} + \Delta i_{jt}$$

$$\Delta i_{jt} = \frac{2Bk_{j2}}{A} (k_{j1}u_r - k_{j2}u_{jt} - k_{j3}i_{jt}) + \frac{2E(u_r - u_{jt})}{A}$$
(7)

其中, $i_{jr(t+1)}$ 为第j个分布式发电装置t+1时刻的目标 参考电流,其值等于上一时刻的目标参考电流 i_{jrt} 加 上当前时刻的电流变化量 Δi_{ito}

分布式发电装置获得目标参考电流 i_{jn} 后通过 电流控制环使输出电流跟踪参考电流。各个分布式 发电装置只能检测到当地的母线电压和输出电流信 息,不能得知其他分布式发电装置的信息,但由于采 用该控制策略的分布式发电装置都是理性的,即每个 分布式发电装置都通过最小化自己的成本函数来追 求自己的最大利益,博弈的最终结果是整个微电网 系统达到纳什均衡状态,即直流母线电压稳定在设 定值,各个分布式发电装置的输出功率得到均分。

2 小信号建模与分析

为了分析基于博弈论微电网控制策略的动态性能,对系统进行小信号建模。图1中变换器的小信号扰动方程为^[16]:

$$\begin{cases}
\hat{i}_{in} = \hat{i}_L D + I_L \hat{d} \\
\hat{u}_{out} = \hat{u}_{in} D + U_{in} \hat{d}
\end{cases}$$
(8)

根据式(8),Buck 变换器的小信号等效电路模型 如图 2 所示。



图 2 Buck 变换器小信号等效电路模型

Fig.2 Equivalent small signal circuit of Buck converter

假设输入电压的扰动为 0,即 *û*_{in}=0,因此有输出 电压的传递函数:

$$G_{\rm ud}(s) = \frac{\hat{u}_{\rm o}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{\left(\frac{1}{Cs} / / R\right) U_{\rm in}}{\frac{1}{Cs} / / R + Ls} = \frac{U_{\rm in}}{s^2 L C + s L / R + 1}$$
(9)

同样可以得到输出电流的传递函数为:

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_{L}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{\hat{u}_{o}(s)}{\hat{d}(s)} \frac{\hat{i}_{L}(s)}{\hat{u}_{o}(s)} = G_{ud}(s) \frac{\hat{i}_{L}(s)}{\hat{u}_{o}(s)} = \frac{1 + sCR}{s^{2}LC + sL/R + 1} \frac{U_{in}}{R}$$
(10)

采用基于博弈论的控制时,输出电流参考值为:

$$\hat{i}_{o_{ref}} = K \frac{1}{s} (k_{j1} \hat{u}_{o_{ref}} - k_{j2} \hat{u}_{o} - k_{j3} \hat{i}_{o}) + K' \frac{1}{s} (\hat{u}_{o_{ref}} - \hat{u}_{o}) (11)$$

采用 PI 调节器控制输出电流,得到占空比为:
 $\hat{d} = (\hat{i}_{o_{ref}} - \hat{i}_{o})(K_{P} + K_{1} \frac{1}{s})$ (12)
将式(11)代入式(12)可得:

$$\hat{d} = \left[(k_{j1}G_1(s) + G_2(s)) \hat{u}_{0_ref} - (k_{j2}G_1(s) + G_2(s)) \hat{u}_0 - (k_{j2}G_1(s)) \hat{u}_0 - (k_{j2}G_1(s)) \hat{u}_0 -$$

 $(k_{j3}G_{1}(s)+1)\tilde{t}_{o}]G_{3}(s)$ (13) $\ddagger \oplus, G_{1}(s) = K\frac{1}{s}, G_{2}(s) = K'\frac{1}{s}, G_{3}(s) = \left(K_{P}+K_{1}\frac{1}{s}\right),$

$$K = \frac{2Bk_{j2}}{A}, K' = \frac{2E}{A}_{\circ}$$

因此可以得到系统控制框图如图 3 所示。





3 仿真分析

为进行对比,首先采用输出电流反馈的下垂控 制方法对 2 个分布式发电装置进行仿真。系统仿真 参数设置为:输出电感为 10⁻² H,输出电容为 300 μF, 开关频率为 2 kHz,负载为 20 Ω。下文用支路 1 表示 分布式发电装置 1,用支路 2 表示分布式发电装置 2。2 个分布式发电装置的输出电流见图 4(a),两者误差 不超过 5%,因此采用下垂法能够得到良好的均流 特性。直流母线电压如图 4(b)所示,在 20 ms 时系统 进入稳态,但是直流母线电压仅维持在 22 V,未能达 到 24 V 的设定值。可见,当采用传统下垂法控制时,



图 4 采用下垂控制时输出特性

Fig.4 Output characteristics of droop control

尽管系统能够具备良好的均流特性,但是直流母线电 压会发生偏离。

采用基于博弈论的控制策略,通过定义成本函数式(6),对分布式发电装置的输出电流进行控制。在 50 ms 时突卸部分负载以考核该控制策略的动态特性,得到图 5 的输出特性曲线。从图中可以看出,系统在 20 ms 进入稳态,直流母线电压稳定在设定值 24 V,且当负载发生突变时直流母线电压能很快得到恢复。同时分布式发电装置的输出电流也得到均分,误差小于 5%。当参与的分布式发电装置数量较少时,采用博弈论控制方法的电流谐波会较高,但随着参与博弈的发电装置数量的增加会逐渐降低。





4 实验分析

为验证理论分析和仿真结果的有效性,建立了 由3组太阳能发电模拟装置所组成的微电网系统, 分别用支路1、支路2、支路3表示。单台太阳能发电 模拟装置最大功率为300W,用来模拟太阳能电池 板的输出特性。3组太阳能模拟器通过采用博弈论 控制的变换器组成一个微型直流电网并进行了实验 研究。实验中,各个变换器检测自身当前时刻的输出 电压、输出电流,利用式(7)以及当前时刻的期望电 流,计算得到下一时刻的期望电流,然后利用 PI 控 制器控制变换器的输出电流跟踪期望电流。

图 6 为采用基于博弈论的控制策略所得到的微 电网达到纳什均衡时的控制特性。从图 6(a)中可以 看出,由分布式发电装置所检测的直流母线电压稍 有不同,这是由于各自传感器的检测误差造成的,但 是其平均电压为 23.9 V。而图 6(b)中 3 条输出电流 曲线也非常接近,表明采用此控制策略的系统中各 分布式发电装置输出功率均分。

图 7 为微电网达到纳什均衡状态时突加负载时 的输出特性曲线。从图中可以看出当系统达到纳什 均衡时,即使负载发生突变,系统也能够重新达到一



图 6 微电网达到纳什均衡时的输出特性 Fig.6 Output characteristics when microgrid





个新的纳什均衡状态,在此过程中各个分布式发电 装置能够实现功率均分。

图 8 和图 9 分别是微电网达到纳什均衡状态时



图 8 微电网突然切出一个分布式发电装置时的输出特性 Fig.8 Output characteristics when one generation device is suddenly removed from microgrid



图 9 微电网突然并入一个分布式发电装置时的输出特性 Fig.9 Output characteristics when one generation device

is suddenly added into microgrid

突然切出一个分布式发电装置以及突然并入一个分 布式发电装置时的输出特性曲线。从图中可以看出 当系统达到纳什均衡时,不论切出还是并入一个分 布式发电装置,系统均能够重新达到一种新的纳什 均衡状态,在此过程中各个分布式发电装置能够实 现功率均分。

5 结论

本文对基于博弈论的直流微电网的控制策略进 行了研究,提出了一种通过定义成本函数方法实现 微电网中的分布式发电装置的功率均分。采用虚拟 对手进行博弈的控制策略,使得所有发电装置能够 在无互联线的条件下达到纳什均衡状态。该方法实 现了分布式发电装置功率的均分与直流母线电压的 稳定。仿真和实验证实了所提方法的有效性,系统在 稳态和动态过程中均能够达到纳什均衡。

参考文献:

- [1] SURPRENANT M, HISKENS I, VENKATARAMANAN G. Phase locked loop control of inverters in a microgrid [C] // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Jeju, Korea: IEEE, 2011:667-672.
- [2] 霍群海,唐西胜. 微电网与公共电网即插即用技术研究[J]. 电力 自动化设备,2013,33(7):105-110.
 HUO Qunhai, TANG Xisheng. Plug-and-play technology applied in microgrid and utility grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):105-110.
- [3] 张尧,马皓,雷彪,等. 基于下垂特性控制的无互联线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.
- [4] 陈晶晶,陈敏,姚玮,等. 无线并联逆变器的输出阻抗设计[J]. 电 力电子技术,2007,41(13):63-65.

CHEN Jingjing, CHEN Min, YAO Wei, et al. Output impedance design of wireless parallel-connected inverters [J]. Power Elec-

tronics, 2007, 41(13):63-65.

[5] 姚玮,陈敏,陈晶晶,等. 一种用于无互连线逆变器并联的多环控制方法[J]. 电工技术学报,2008,23(1):85-89.

YAO Wei, CHEN Min, CHEN Jingjing, et al. An improved wireless control strategy for parallel operation of distributed generation inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1):85-89.

[6] 林新春,段善旭,康勇,等.基于下垂特性控制的无互联线并联 UPS 建模与稳定性分析[J].中国电机工程学报,2004,24(2): 33-38.

LIN Xinchun, DUAN Shanxu, KANG Yong, et al. Modeling and stability analysis for parallel operation of UPS with no control interconnection basing on droop characteristic [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 33-38.

[7] 邢岩,严仰光. 电流型调节逆变器的冗余并联控制方法[J]. 中国 电机工程学报,2004,24(11):199-202.

XING Yan, YAN Yangguang. Control for current regulated inverters in redundant parallel operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 199-202.

- [8] 梁建钢,金新民,吴学智,等. 基于下垂控制的微电网变流器并网运行控制方法改进[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):59-64.
 LIANG Jiangang,JIN Xinmin,WU Xuezhi, et al. Improved gridconnection operation of microgrid converter based on droop control[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4): 59-64.
- [9] 方天治,阮新波,肖岚,等.一种改进的分布式逆变器并联控制策略[J].中国电机工程学报,2008,28(33):30-36.

FANG Tianzhi, RUAN Xinbo, XIAO Lan, et al. An improved distributed control strategy of parallel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(33): 30-36.

- [10] HADDADI A, SHOJAEI A, BOULET B. Enabling high droop gain for improvement of reactive power sharing accuracy in an electronically-interfaced autonomous microgrid[C]//Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Jeju, Korea; IEEE, 2011: 673-679.
- [11] AVELAR H J,PARREIRA W A,VIEIRA J B,et al. A state equation model of a single-phase grid-connected inverter using a droop control scheme with extra phase shift control action[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,26(3):1527-1537.

- [12] KIM Jaehong, GUERRERO J M, RODRIGUEZ P, et al. Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC Microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3):689-701.
- [13] 顾巧论,高铁杠,石连栓.基于博弈论的逆向供应链定价策略分析[J].系统工程理论与实践,2005,25(3):20-25.
 GU Qiaolun,GAO Tiegang,SHI Lianshuan. Price decision analysis for reverse supply chain based on game theory [J]. Systems Engineering-Theory & Practice,2005,25(3):20-25.
- [14] MA Zhongjing, CALLAWAY D S, HISKENS I A. Decentralized charging control of large populations of plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011,21(1):67-78.
- [15] 陈坚. 电力市场环境下发电商报价策略研究[D]. 长沙:中南大 学,2006.

CHEN Jian. Bidding strategy research of generation company in electricity market environment[D]. Changsha;Central South University,2006.

[16] 丘东元,张波,韦聪颖. 自主均流型 Buck 变换器并联系统的建模与设计[J]. 华南理工大学学报,2006,34(4):56-60.
QIU Dongyuan,ZHANG Bo,WEI Congying. Modeling and design of paralleled Buck converter system with automatic current sharing technique[J]. Journal of South China University of Technology,2006,34(4):56-60.

作者简介:



冬 雷(1967-),男,河北唐山人,副教 授,博士,研究方向为电力电子与电力传动及 新能源发电系统(**E-mail**:pemc.bit@163.com); 黄晓江(1985-),男,河北张家口人,博士 研究生,研究方向为电力电子及新能源发电 技术;

肖辅荣(1989-),男,江西吉安人,博士研 究生,研究方向为电力电子及新能源发电技术:

吴明轩(1988-),男,海南海口人,硕士研究生,研究方向为 电力系统及新能源发电技术;

廖晓钟(1962-),女,浙江嘉兴人,教授,博士,研究方向为 运动控制系统的设计与分析。

Control strategy based on game theory for DC microgrid without wire interconnections

DONG Lei, HUANG Xiaojiang, XIAO Furong, WU Mingxuan, LIAO Xiaozhong

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A control strategy based on game theory is proposed for the power sharing among the distributed generation devices in DC microgrid without wire interconnections. Based on the concept of virtual rival and according to its own cost function, each generation device competes with others in the control of DC bus voltage, resulting in the Nash equilibrium of both DC bus voltage and output current. The given cost function integrates the output power of distributed generation device with the historical and present DC bus voltage errors. A small signal model is derived to analyze the dynamic performance of system. Simulative and experimental results show the power sharing among all distributed generation devices is achieved, validating the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: microgrid; game theory; Nash equilibrium; power sharing; distributed power generation; stability