

# 孤立微网中微源的黑启动能力

牟龙华, 夏明栋, 刘 仲

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 从各微源特性出发对微源的黑启动能力进行了深入的研究,应用贝叶斯决策网制定了根据效用值选取微网黑启动主参考源的优化策略.在 MATLAB/Simulink 平台搭建了燃气轮机、蓄电池、光伏和风力发电模型,通过仿真试验对比了各个微源的黑启动能力,并通过算例验证了贝叶斯优化决策方法的可行性.分析结果表明,微型燃气轮机与蓄电池由于其良好的功率输出能力与输出电压的稳定性,是良好的微网黑启动源,光伏发电与风力发电由于受外界影响较大而不适合作为黑启动源.

**关键词:** 微网; 黑启动; 微源; 贝叶斯优化策略

**中图分类号:** TM76

**文献标志码:** A

## Research on Black-start Capability of Microsources in Isolated Microgrid

MU Longhua, XIA Mingdong, LIU Zhong

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of each microsource, the black-start capability of microsources is researched and Bayesian decision method is applied to optimize the selection plan of black start primary reference source under different initial conditions. The models of microturbine, battery, solar and wind power generation are built in MATLAB/Simulink platform. By the simulation results, the black-start capability of each microsource is compared and the feasibility of Bayesian decision method is validated. The results show that the microturbine and battery are good black-start sources in microgrids due to their excellent capability of power output and the stability of voltage output. Photovoltaic power generation and wind power generation influenced by the outside environment are not suitable as black start sources.

**Key words:** microgrid; black-start; microsource; Bayesian decision

以风能、太阳能为代表的分布式电源作为可再生的清洁能源正逐渐被大量地应用于电力行业,有着十分广阔的应用前景<sup>[1]</sup>.但是,分布式电源直接并入传统的大电网将会对大电网稳定运行造成较大的冲击.整合分布式发电系统、储能元件和负载的微网技术将是解决大规模分布式发电系统并网问题的有效途径<sup>[2]</sup>.

当因大电网故障或微网内部故障导致微网内用户全部停电时,微网就需要进行黑启动以使微网能尽快恢复负荷供电,进而推动整个电网的供电恢复.所谓微网黑启动(black start),就是指在整个微网因外部或内部故障停运进入全黑状态后,不依靠大电网或其他微网的帮助,仅通过启动微网内部具有黑启动能力的微源,进而带动微网内无黑启动能力的微源,逐步扩大系统的恢复范围,最终实现整个微网的重新启动<sup>[3-4]</sup>.

关于黑启动中微源控制方式及黑启动方案的研究已较为深入,但对微源黑启动能力的研究还较为薄弱.文献[5-8]讨论了微网中不同微源特性并选择了相应的逆变器控制方式,对一个主微源控制和多个主微源控制进行了分析,并给出微网黑启动模型.文献[9]从微网系统和微源 2 个角度同时考虑,提出了一种可以兼顾调度指令和关键设备响应的微网系统黑启动控制方案,同时将微网的并行恢复和串行恢复进行了比较.微网系统中分布式电源的一次能源可以是风能、太阳能、水能、蓄电池储能、微型燃气轮机等.与传统电力系统相比,微网系统中的能源种类相对复杂得多.但现有文献都未对各类微源的黑启动能力进行深入的研究.

本文从微网中各微源的特性出发,根据各微源自启动运行能力对微源的黑启动能力进行了深入分析,并根据贝叶斯优化决策方案,制定了黑启动中主参考源的选取方案.参照已投运的微网实验平台,在

收稿日期: 2014-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(51407128);上海市自然科学基金(12ZR1451300)

第一作者: 牟龙华(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为电力系统继电保护、分布式发电与微电网、电能质量.

E-mail: lhmu@tongji.edu.cn

MATLAB/Simulink 平台搭建燃气轮机、蓄电池、光伏和风力发电模型,通过仿真试验对比各个微源的黑启动能力,验证微源黑启动能力方案的有效性.

## 1 传统电力系统与微网电源比较

系统全停后恢复的顺利实现关键在于黑启动电源,即具有自启动能力也称黑启动能力的机组.

传统电力系统中,水轮机的启动对厂用电要求很低,有时甚至几乎不需要厂用电,与火电、核电机组相比,其具有辅助设备简单、启动速度快等优点,理所当然地成为了黑启动电源的首选<sup>[10]</sup>.燃气轮机的启动对厂用电要求也比较低,部分燃气轮机略加改造就可作为黑启动电源.此外,柴油机发电机组也可作为黑启动电源.

孤岛运行的微网系统在黑启动过程中需采用电力电子器件实现电源的恒压恒频控制,为微电网提供稳定的电压和频率支撑.因此,微网电源相对于传统电力系统存在以下区别:

(1) 分布式电源的一次能源可以是风能、太阳能、水能、蓄电池储能、微型燃气轮机等.与传统电力系统相比,微网系统中的能源种类相对复杂得多;同时风能、太阳能等可再生能源具有间歇性,输出不稳定.

(2) 微网中大量分布式电源无法直接并网,必须使用电力电子装置进行功率转换.与传统旋转机械类电源相比,逆变器型微源具有响应速度快、控制灵活等优势,但过载能力差,惯性小.

(3) 微网中微源运行工况复杂.在并行恢复中,具有黑启动能力的微源存在控制模式切换问题.

传统电力系统与微网电源的对比如表 1 所示.

表 1 传统电网与微网电源的区别

Tab.1 Differences of power supply between grid and microgrid

项目	传统电网	微网
电源类型	旋转机械类电源	逆变器型电源
电压等级	$\geq 110$ kV	$\leq 10$ kV
单机容量	$\geq 100$ MW	$\leq 1$ MW
电源启动时间	分钟级	秒级
黑启动电源类型	抽水蓄能机组 大型燃气机组	储能单元、微型 燃气轮机等
非黑启动电源类型	以火力发电机组为主	以可再生能源 发电装置为主
非黑启动电源特性	电压源输出特性 有调频调压能力	电流源输出特性 无调压调频能力

## 2 微源黑启动能力分析

微源的黑启动能力主要考察微源独立启动运行时功率供给、电压幅值以及微网频率的稳定性,如果停机后能重新带一定负荷自启动稳定运行且能提供稳定供给,那么该微源就具有黑启动能力<sup>[11]</sup>.本文从功率和电压幅值以及频率稳定性 3 个方面对微型燃气轮机、光伏发电微源、风力发电微源以及储能装置的黑启动能力进行研究.

### 2.1 微型燃气轮机的黑启动能力

微型燃气轮机(microturbine, MT)是一种新型的热能动力系统,它具有寿命长、可靠性高、燃料适应性好、环境污染小和控制灵活等优点,因此被称为最佳的分布式发电方式,目前微型燃气轮机主要分 2 种结构:一种是单轴结构,另外一种是分轴结构<sup>[12]</sup>.单轴结构微型燃气轮机发电系统具有系统效率高、结构紧凑、可靠性高的特点,是微型燃气轮机的主流产品,本文以单轴微型燃气轮机为例研究微型燃气轮机的黑启动能力.典型的微型燃气轮机发电系统如图 1 所示.图中 PMSG 为直驱永磁同步发电机.

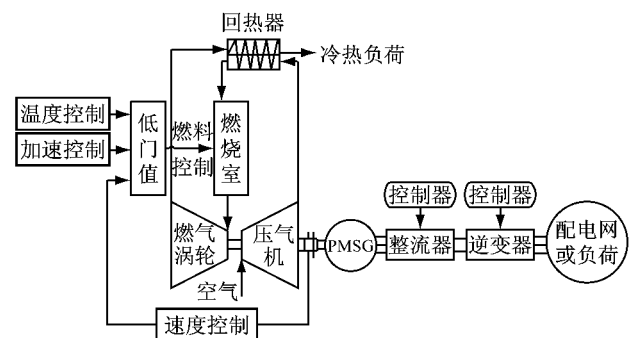


图 1 微型燃气轮机发电系统

Fig.1 Microturbine power generating system

微型燃气轮机的控制包括转速控制、加速度控制、温度控制及燃料控制.其转速控制系统分为有差和无差 2 种方式<sup>[13]</sup>,这 2 种方式是为了适应不同的负荷特性而设计的.有差控制方式如图 2 所示,参考转速  $\omega_{ref}$  和实际转速  $\omega$  的偏差作为控制输入,采用超前-滞后传递函数进行控制,其中  $G$  为控制器增益,  $T_1$  和  $T_2$  分别为超前-滞后时间常数.在燃气轮机启动过程中,转速控制能够适应黑启动过程中快速变化的负荷,保证黑启动中输出电压幅值和频率的稳定性.

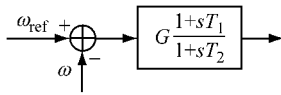


图 2 转速控制方式  
Fig.2 Speed control

加速度控制则在微型燃气轮机起机时限制转子的加速度,改善起机时的热应力,确保微型燃气轮机安全快速启动,有利于加快黑启动进程。

经过速度控制环节和加速度控制环节,微型燃气轮机能够稳定启动,输出稳定的电压幅值与频率,满足跟踪负荷变化的要求.当 MT 系统的逆变器采用 VSI(电压型逆变器)时,微型燃气轮机能够实现无源逆变,这使得它不仅可以并网运行,而且可以孤立运行。

综上所述,鉴于微型燃气轮机的快速启动能力,其可为微网提供稳定的电压和频率支撑,在负荷变化时实现微网的快速稳定黑启动。

### 2.2 光伏发电微源的黑启动能力

光伏发电是利用半导体材料的光电效应将太阳能转换为电能.图 3 给出了光伏组件的等效电路模型<sup>[14]</sup>,以该模型来研究光伏发电微源的黑启动能力.图中, $I_L$  为光生电流, $I_d$  为暗电流, $R_{sh}$  为等效旁路电阻, $R_s$  为等效串联电阻, $V_A$ 、 $I_A$  分别为光伏组件的输出电压和电流。

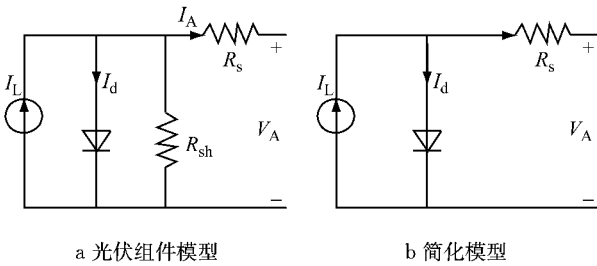


图 3 光伏组件等效电路  
Fig.3 Equivalent circuit of PV module

由于  $R_{sh}$  阻值的数量级为  $10^3 \Omega$ ,故可将图 3a 简化为图 3b 所示的模型,根据基尔霍夫电流定律得到光伏组件的  $I_A$  与输出功率  $P_A$  可表示为

$$I_A = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_A + I_A R_s)}{K_b n T_k}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$P_A = V_A \cdot I_A \quad (2)$$

式中: $q$  为电子电荷电量; $K_b$  为波尔兹曼常数; $n$  为二极管理想系数; $T_k$  为太阳能光伏电池的温度。

由式(1)和式(2)可知,光伏阵列输出的功率决定于光伏组件短路电流、光伏组件热电势、二极管饱和电流,而该 3 个参数都与光照强度和温度有关,其有功功率输出特性的随机性很大,很容易造成电网

频率波动.同时,光伏发电输出功率的随机波动会给电网的暂态特性和电压稳定性带来非常显著的影响.因此在微网的黑启动过程中,光伏发电不能为微网提供稳定的电压幅值和频率支撑,即光伏发电不具备黑启动能力,其适宜于在微网运行中通过恒功率(PQ)控制方式输出恒定的功率。

### 2.3 风力发电微源的黑启动能力

风力发电中的风电机组也是很多微网组网中重点考虑的微源<sup>[15]</sup>.风力机轴上输出的机械功率为

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 v^3 \quad (3)$$

式中: $C_p$  为风能利用系数; $\rho$  为空气密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $R$  为风机半径,  $\text{m}$ ;  $v$  为风速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

风力发电机的输出功率为

$$P = P_m \eta \quad (4)$$

式中: $\eta$  为风力发电机效率。

由式(3)、式(4)可知,风力发电输出功率受空气密度、风速、叶片长度、叶片受风面积等影响.风资源的不确定性和风电机组本身的运行特性使风电机组的输出功率是波动的,这可能会影响电网的电能质量,如电压偏差、电压波动和闪变、谐波等.因此,在微网的黑启动过程中,风电机组不能为电网提供稳定的电压和频率支撑.综合考虑风电机组的各种特性,其也属于不具有黑启动能力的微源。

### 2.4 储能及其他微源的黑启动能力

微网中微源多是清洁能源,这些清洁能源的供给不确定性导致了相应微源的输出不稳定性,所以在微网组网时,多配备大容量储能单元,利用储能单元的快速调节特性和充放电状态切换来减缓其他微源带来的冲击.本文以蓄电池为例研究储能单元的黑启动能力.蓄电池数学模型如图 4 所示.图中  $U_s$  为理想电压源, $R_{cs}$  为蓄电池内阻, $U_t$  为蓄电池端电压, $I$  为充放电电流。

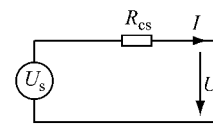


图 4 蓄电池等效电路  
Fig.4 Battery Equivalent Circuit

在等效模型中

$$U_t = U_s - IR_{cs} \quad (5)$$

假设  $U_s$ 、 $R_{cs}$  是蓄电池荷电状态 (state of charge, SOC) 值 ( $S_{soc}$ ) 的线性函数,则

$$U_s = U_{oc} - K_u(1 - S_{soc}) \quad (6)$$

$$R_{cs} = R_0 - K_r(1 - S_{soc}) \quad (7)$$

式中:  $U_{oc}$  为蓄电池充满电 ( $S_{soc}$  为 1) 时的开路电压;  $R_0$  为蓄电池充满电时的内阻; 系数  $K_u, K_r$  可通过恒流放电试验确定. 综合式(5), 得

$$U_t = U_{oc} - IR_0 - (K_u - K_r)(1 - S_{soc}) \quad (8)$$

$$P = U_t I \quad (9)$$

式(8)、式(9)建立了  $P, U_t$  与 SOC 之间的关系式, 在微网中蓄电池启动时间很短, 荷电状态 SOC 基本保持不变, 因而蓄电池可以在启动过程中维持输出功率、电压幅值和频率的稳定.

因此在微电网孤岛运行时, 蓄电池可为电网提供稳定的电压和频率支撑. 所以, 蓄电池是具有黑启动能力的微源.

其他大容量的储能单元, 如超级电容、飞轮储能单元, 在停机后都能快速重新启动, 具有良好的黑启动能力. 此外, 燃料电池既可像蓄电池一样安静地提供清洁电力, 又可像内燃机一样重新添加燃料, 所以也是具有黑启动能力的微源.

### 2.5 微源黑启动能力的比较

微网中微源的种类较多, 能源供给类型多样化, 所以微网中可同时存在多种具有黑启动能力的微源, 这是与传统大电网区别较大的地方, 也是微网黑启动策略制定的关键因素. 综合以上分析, 各类微源的黑启动能力见表 2.

表 2 微源的黑启动能力

Tab.2 Black start capability of microsources

微源	黑启动能力
微型燃气轮机	有. 燃料供给稳定, 运行可靠性高, 动态性能好, 启动速度快
风力发电	无. 受风力变化影响、能源输出不稳定
光伏发电	无. 受天气变化影响、能源输出不稳定
燃料电池	有. 燃料供给稳定, 运行可靠, 启动速度快
大型储能单元 (蓄电池、飞轮等)	有. 能快速调节、切换充放电状态, 动态性能好, 启动速度快

## 3 黑启动能力微源的启动策略研究

在微网黑启动初期, 由于具有黑启动能力的微源相继启动, 加快了网络恢复速度. 微网黑启动过程中, 可根据启动时间、负荷大小以及微源容量选择适宜的微源作为微网黑启动的主参考源, 为其他微源提供稳定的电压和频率支撑.

采用贝叶斯决策网来选取微网黑启动中的主参考源, 通过计算不同运行情况以及微源状态下的效用, 选取最合适的主参考源. 叶斯网 ( $B_N$ ) 是一个二元组.

$$B_N = (G, P) \quad (10)$$

式中:  $G$  为有向无环图,  $G=(V, E)$ ,  $V$  为图中结点集合, 对应于域中的变量, 每个变量具有有限个互斥的状态集合,  $E$  为有向边集, 表示结点变量之间的因果依赖关系;  $P$  为结点的概率分布, 表示结点之间因果影响强度.

贝叶斯决策网目的是微网黑启动主参考源的选取实现最优化, 使微网在黑启动过程中稳定快速地建立起电压和频率, 恢复网络供电. 对于主参考源的选取需考虑以下几个变量的影响.

(1) 微源启动时间 ( $t$ ): 微源的启动时间是黑启动微源的重要特性, 将微源电压建立到额定电压 90% 时所需要的时间作为电压成功建立时间, 负荷越重要对微源启动时间要求越高.

(2) 负载大小 ( $f_L$ ): 不同的负荷可以选取不同的微源.

(3) 荷电状态值 ( $S_{soc}$ ): 荷电状态越大, 储能装置容量越大, 越可以作主参考源维持系统电压与频率稳定.

(4) 微源容量 ( $f_c$ ): 微源容量越大越适宜作为主参考源.

如果能掌握这些变量和应选取微源之间的内在关系, 通过客观概率确定各个因素之间的结点概率信息, 通过效用计算公式计算各个决策方案的效用值, 通过比较各个微源的效用值大小就能够较准确地选取黑启动主参考微源.

建立上述 4 个变量与应选取的微源的贝叶斯网络如图 5 所示. 图中,  $T, L, S, C$  分别为微源的启动时间设定值、微源负载设定值、储能装置荷电状态设定值、微源容量设定值, 可以根据微网规模合理设定.

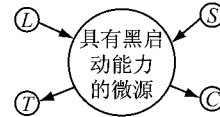


图 5 贝叶斯决策网

Fig.5 Bayesian decision network

以贝叶斯决策网来建立一个选择模型, 确定上述 4 个变量的取值范围, 并进行两段离散化处理, 当变量大于或小于设定值时分别用下标  $b, s$  表示, 则

$$t = \begin{cases} T_s, & t < T \\ T_b, & t \geq T \end{cases} \quad (11)$$

$$f_L = \begin{cases} L_s, & f_L < L \\ L_b, & f_L \geq L \end{cases} \quad (12)$$

$$S_{soc} = \begin{cases} S_s, & S_{soc} < S \\ S_b, & S \leq S_{soc} \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

$$f_c = \begin{cases} C_s, & f_c < C \\ C_b, & f_c \geq C \end{cases} \quad (14)$$

微网黑启动过程中,采用多代理系统将微网系统分为几个环节,可以通过微网控制中心(microgrid control center, MGCC)将系统中微源容量与负载信息代入下式进行效用计算:

$$P(D_e) = P(P_a | D_e, E) \cup (P_a) \quad (15)$$

式中: $D_e$  为决策点; $P_a$  为效用结点的父结点.

采用贝叶斯决策网选取微网黑启动主参考源的优化策略为:根据式(15)以及贝叶斯公式计算得到具有黑启动能力微源的效用值,选取效用值最大的作为微网黑启动的主参考源.考虑到黑启动中存在所选定的主参考源启动失败的可能,当选定的主微源启动失败时,则选取效用值较大的微源作为微网的主参考源,各微源以该微源的电压与频率进行组网.

需要说明的是,本文仅将影响条件进行简单的两段式离散,在应用中可将条件细分为多个区间,使决策更为精确合理. $T, L, S$  与  $C$  值的确会影响概率分布,选择适宜的设定值可以使决策更加精确合理.

## 4 微源黑启动能力的仿真验证

### 4.1 微源黑启动能力验证

为验证本文所研究的各微源黑启动能力的准确性,在 MATLAB/Simulink 平台搭建 4 种微源的模型,各微源功率、频率及电压波形如图 6. 观察微源带负载时的自启动过程,通过分析这些微源的输出功率、电压来验证微网的黑启动能力. 仿真试验中,光伏发电模型参数:参考温度为  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,光照强度为  $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,光伏阵列最大输出功率为  $5.7\ \text{kW}$ ,负载为  $3\ \text{kW}$ ,仿真时间为  $2\ \text{s}$ . 风力发电模型参数:桨叶半径为  $4\ \text{m}$ ,额定风速为  $12.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,最佳叶尖速比为  $8$ ,最大风能利用系数取  $0.48$ ,最大输出功率为  $5\ \text{kW}$ ,负载为  $4\ \text{kW}$ ,仿真时间为  $2\ \text{s}$ . 微型燃气轮机模型:负荷额定线电压为  $380\ \text{V}$ ,原动机额定转速为  $96\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,输出功率为  $5\ \text{kW}$ ,负载为  $4\ \text{kW}$ ,仿真时间为  $0.2\ \text{s}$ . 微型燃气轮机系统的输出经 LCL 滤波后,经隔离变压器与  $4\ \text{kW}$  的负荷相连. 蓄电池模型:容量为  $500\ \text{Ah}$ ,额定电压为  $380\ \text{V}$ ,最大功率为  $5\ \text{kW}$ ,负载为  $3\ \text{kW}$ ,仿真时间为  $0.2\ \text{s}$ .

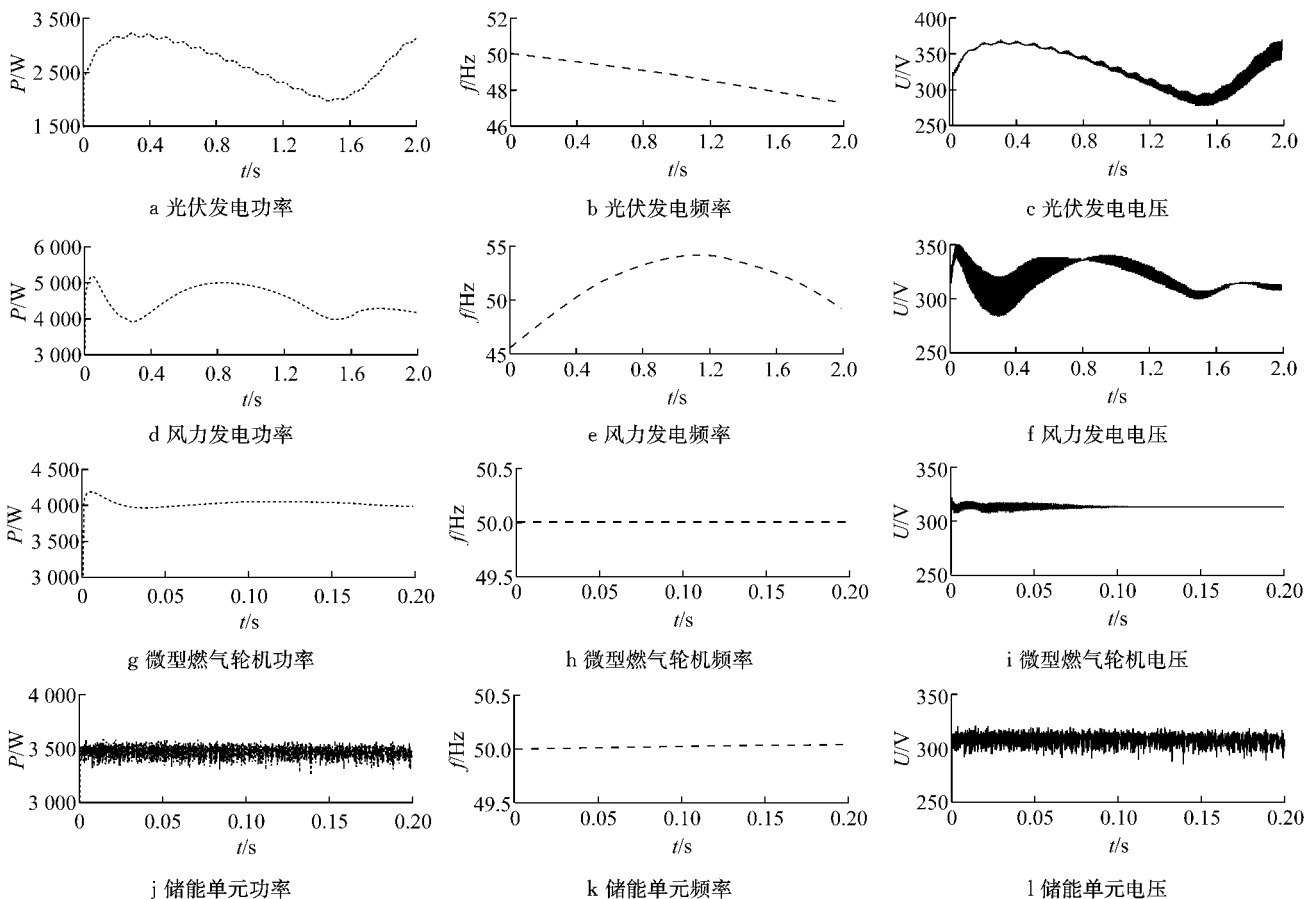


图 6 功率、频率及电压仿真波形

Fig.6 Power, frequency and voltage simulation waveform

由图 6 可见,微型燃气轮机与蓄电池功率输出稳定,能为负载提供稳定的输出功率,且电压幅值与频率稳定并能在较短的时间内完成电压的建立,能快速地黑启动中的其他微源提供稳定的电压与频率支撑,具有良好的黑启动能力.光伏发电与风力发电由于受外部温度、风力、光照的影响,功率随机波动,不能为负载提供稳定的功率,且造成了输出电压幅值与频率的较大波动,不能为微网黑启动中其他微源提供电压与频率支撑,因此风力发电与光伏发电微源都是不具有黑启动能力的微源.

4.2 微源主参考源选取算例

以已搭建的微网为例,选取  $T=20\text{ ms}$ ,  $L=3\text{ kW}$ ,  $S=0.6$ ,  $C=3\text{ kVA}$ , 选取效用值最大的微源作为微网黑启动的主参考源,并按照大小关系依次并入网中,此时贝叶斯概率分布如表 3 和图 7 所示.

表 3 储能装置的概率值

Tab.3 Probability of storage device

负载与荷电状态	概率值
$L_b, S_b$	0.45
$L_b, S_s$	0.30
$L_s, S_b$	0.70
$L_s, S_s$	0.55

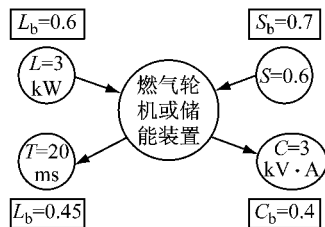


图 7 贝叶斯决策网及其概率分布

Fig.7 Bayesian decision network and its probability distribution

贝叶斯决策过程如下:

(1) 当 MGCC 没有接受到任何信息的情况下,可以通过计算燃气轮机与储能装置的效用值来选取主参考源.根据式(15)及贝叶斯公式计算得到此时储能装置和燃气轮机的效用值  $P(B)$ ,  $P(M)$  分别为

$$P(B) = \sum \sum P(B | L, S)P(L, S) = 0.45 \times 0.6 \times 0.7 + 0.3 \times 0.6 \times 0.3 + 0.7 \times 0.4 \times 0.7 + 0.55 \times 0.4 \times 0.3 = 0.505$$

$$P(M) = 1 - P(B) = 0.495$$

在没有任何先验信息的情况下,储能装置效用值较大,系统选取储能装置作为微网黑启动主参考源为系统提供电压与频率支撑.

(2) 当 MGCC 中信息为  $L_b, S_b, T_b$  时,同样可以计算得到储能装置的效用值为

$$P(B | T_b, L_b, S_b) =$$

$$\frac{P(T_b | B, L_b, S_b)}{P(T_b, L_b, S_b)} P(B, L_b, S_b) =$$

$$\frac{P(T_b | B)P(B | L_b, S_b)}{P(T_b | B)P(B) + P(T_b | M)P(M)} = 0.401$$

$$P(M) = 1 - P(B) = 0.599$$

此时在  $L_b, S_b, T_b$  的先验条件下,燃气轮机效用值较储能装置效用值大,选取燃气轮机作为黑启动主参考源为系统提供电压与频率支撑.

(3) 试验(2)条件下选定微型燃气轮机作为主参考源,假设微型燃气轮机启动失败,当 MGCC 检测到微型燃气轮机在启动时间  $T$  后并未建立起有效的电压,判定为主参考源启动失败,将选用效用值次之的储能装置作为应急主参考源,为系统提供电压与频率的支撑.

可见,贝叶斯决策网可以根据不同的运行条件选择合适的主参考源,并在主参考源启动失败时选用效用值次之的储能装置作为主参考源,成功实现微网黑启动.

5 结论

从微源的数学模型出发,研究了微型燃气轮机、风力发电、光伏发电和储能装置在微网黑启动中的黑启动能力.微型燃气轮机和储能装置具有良好的黑启动能力,而风力、光伏发电微源由于受自然因素的影响,输出有较大的波动性而不具有黑启动能力.根据不同初始条件下的黑启动情况,应用贝叶斯决策网制定了根据效用值选取微网黑启动主参考源的优化策略,并通过算例验证了该策略的可行性.

参考文献:

[1] Lasseter R H, Eto J H, Schenkman B, et al. CERTS microgrid laboratory test bed[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 325.  
 [2] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, et al. Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids—A general approach toward standardization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158.  
 [3] 孟强, 牟龙华, 许旭锋, 等. 孤立微网的黑启动研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 24(2): 92.  
 MENG Qiang, MU Longhua, XU Xufeng, et al. Research on isolated microgrid black-start[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 24(2): 92.  
 [4] 谢夏慧, 汪泓, 卢鸣凯, 等. 大停电后初期基于分布式电源的配电网局部自我恢复方案[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1834.  
 (下转第 1887 页)