

带蓄电池 SOC 反馈的虚拟同步发电机系统

陈虹妃¹, 张宸宇², 缪惠宇¹, 杨 赟¹, 郑建勇¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:为了更好地模拟同步发电机的惯性环节并发挥不同储能单元的优势,对带有蓄电池和超级电容组成的混合储能单元的虚拟同步发电机系统进行研究,详细分析了系统的数学模型和控制策略,考虑储能元件自身的特点以及蓄电池的使用寿命,提出了含蓄电池荷电状态(state of charge, SOC)反馈的虚拟同步发电机系统控制策略。通过搭建相应的 MATLAB/SIMULINK 仿真模型,分析蓄电池在正常充电状态与 SOC 达到上限时储能的功率分配情况,验证所提出的控制策略的正确性和有效性。结果表明,所提出的带蓄电池 SOC 反馈控制的虚拟同步发电机系统,可在功率波动时实现功率合理分配,在维持系统的稳定性的同时延长储能的使用寿命。

关键词:虚拟同步发电机;混合储能系统;功率分配;荷电状态

中图分类号:TM921

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)04-0090-07

0 引言

近年来,由于全球能源问题日益严重,分布式发电受到世界各国的广泛关注^[1-2]。并网逆变器连接着分布式电源与电网,其控制策略与性能关系着分布式发电系统的运行状态^[3-4]。虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术作为并网逆变器的一种控制方式^[5],通过虚拟惯量和虚拟阻尼模拟同步发电机的某些特性,有效解决了常规逆变器低惯量、无阻尼的缺点^[6]。

在传统电力系统中,同步发电机起着调节系统频率的作用。而微电网中,希望并网逆变器也具有类似的频率管理能力,能够应对分布式电源间歇性的特点以及负荷的波动^[7]。为此,需要给 VSG 额外配置一定量的储能单元。现有关于 VSG 的研究多为针对逆变器的 VSG 控制策略^[8-14],关于直流侧储能单元的配置与控制的研究较少^[15-18]。

常用的储能装置蓄电池能量密度较大,但循环寿命较短,超级电容功率密度较高,所能补偿的能量有限,采用带蓄电池和超级电容组成的混合储能单元的虚拟同步发电机,可融合不同储能的优势。在系统发生功率波动时,由超级电容补偿高频功率波动,蓄电池补偿低频的功率波动^[19-25]。文献[18]提出了带蓄电池储能的 VSG 系统控制策略,通过变下垂系数的方法间接控制系统出力。文献[22]提出了一种应用于普通逆变器的混合储能系统能量管理方法,使用低通滤波器对功率波动进行高低频分离,实现功率分配,但低通滤波器的截止频率并

未给出理论化的求解方法。文献[25]提出了一种应用于 VSG 的混合储能系统能量分配方法,通过对控制方法的改进,由超级电容模拟 VSG 的惯性环节处理高频功率波动,由蓄电池处理低频功率波动,但并未考虑蓄电池的使用寿命,在系统功率波动较大时不够合理。

本文建立并研究了带有混合储能单元的虚拟同步发电机系统的数学模型,在文献[25]的基础上,进一步考虑蓄电池的荷电状态,给出了一种含蓄电池荷电状态(state of charge, SOC)反馈的 VSG 系统控制策略,使得系统功率波动较大时,更好地发挥储能单元的作用并达到延长蓄电池使用寿命这一目的。

1 虚拟同步机的数学模型

在 VSG 中,可再生能源可视作系统的原动机,储能单元及其变换器对应原动机和同步发电机的转动惯性^[8]。带有混合储能单元的 VSG 系统拓扑如图 1 所示。 $I_1 \sim I_8$ 是带反并联二极管的 IGBT 模块; L_d 和 R_d 分别是 VSG 的同步电感和同步电阻; L_{dc} 是储能侧 Boost 电路的滤波电感; U_{vsgabc} 和 i_{vsgabc} 分别是 VSG 输出的三相电压和三相电流; f 是系统频率; U_{vsgdc} 是 VSG 直流侧电压。

蓄电池经过 Boost 电路与超级电容相连接,两者所构成的混合储能单元与光伏模块共同并联在 VSG 的直流侧,混合储能单元可在光伏出力不足时放电,供负荷使用,也可在光伏出力剩余时进行能量存储。在蓄电池正常充放电的过程中,Boost 电路起着控制 VSG 直流侧电压稳定的作用;当蓄电池充

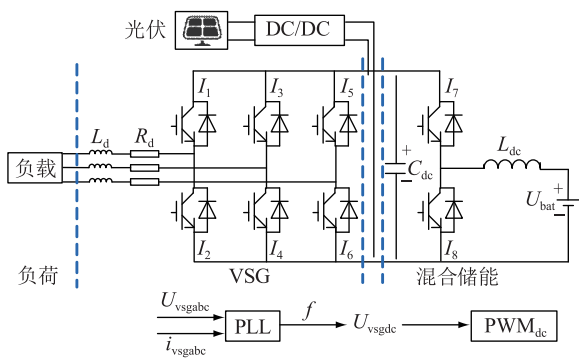


图1 带有混合储能单元的 VSG 系统拓扑

Fig.1 Schematic diagram of VSG system connected to hybrid energy storage

电达到上限时,光伏侧 DC/DC 电路由最大功率点跟踪(MPPT)模式切换为稳定 VSG 直流侧电压。整个过程中,始终保证 VSG 直流侧电压恒定,逆变输出稳定的交流电压并实现有功/无功功率的跟随。

记及同步发电机机械和电磁方程,将 VSG 模拟成传统的同步发电机,由图 1 得 VSG 机械方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \quad (1)$$

式中: J 为转动惯量; D 为阻尼系数; T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩; T_d 为阻尼转矩; ω 为电气角速度; ω_0 为电网同步角速度,由额定频率 $f_0 = 50$ Hz 求得。

VSG 通过虚拟惯量 J 使得逆变器在功率和频率发生波动的过程中具有惯性,通过虚拟阻尼 D 使得逆变器存在阻尼电网功率振荡的能力。这两个参数,提高了分布式发电系统的运行性能。

类比于传统同步发电机有功调节方式,对 VSG 的转矩调节以实现有功调节。机械转矩 T_m 由机械转矩参考值 T_0 与频率偏差反馈值 ΔT 组成, T_0 使得 VSG 输出有功功率跟随参考值,表示为:

$$T_0 = P_{\text{ref}} / \omega \quad (2)$$

式中: P_{ref} 为虚拟同步机的有功功率参考值。频率偏差反馈值 ΔT 用于调节系统频率,根据同步发电机的一次调频特性,将频率调节器取为比例环节^[7], K_f 为调频系数,表示为:

$$\Delta T = K_f (f - f_0) \quad (3)$$

有功调节模块使得 VSG 输出的有功功率跟随参考值的同时,还能对其接入点的频率偏差进行响应,使得逆变器对频率波动具有一定的应对能力^[7]。

类比于传统同步发电机无功-电压调节方式,对 VSG 的虚拟电势模值 E_{abcm} 调节以实现无功-电压调节。虚拟电势由 VSG 的空载电动势 E_0 ,无功功率

偏差指令值 ΔE_Q ,机端电压偏差指令值 ΔE_U 3 部分组成。其中 ΔE_Q 对 VSG 输出的无功功率进行调节, ΔE_U 对 VSG 输出机端电压进行调节,分别表示为:

$$\Delta E_Q = K_Q (Q_{\text{ref}} - Q) \quad (4)$$

$$\Delta E_U = K_U (U_{\text{ref}} - U_m) \quad (5)$$

式中: K_Q 为无功调节系数; Q_{ref} 为无功功率指令值; Q 为 VSG 输出无功功率实际值; K_U 为机端电压调节系数; U_{ref} 为 VSG 机端电压参考值; U_m 为机端电压实际值。

无功调节模块使得 VSG 输出的无功功率跟随指令值的同时,还能对机端电压进行调节,并根据电压的偏差为其提供一定的无功支撑^[7]。

由无功调节模块得到的 E_{abcm} 与有功调节模块得到的 θ 共同得出 VSG 电压向量,进而经过电流滞环的方式,得到控制信号,控制框图如图 2 所示。

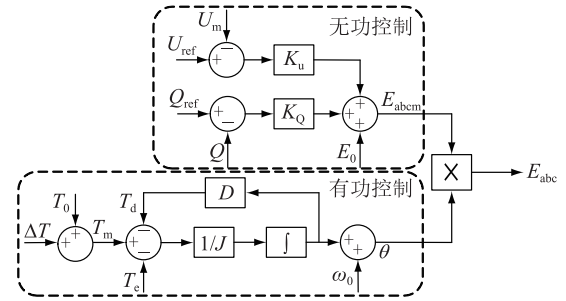


图2 VSG 控制框图

Fig.2 Control block diagram of VSG

2 带蓄电池 SOC 反馈的控制策略

带有混合储能单元的 VSG,通过储能的充放电,增强系统对可再生能源的消纳能力,也可使 VSG 获得持续性的惯性模拟能力。前述控制方法为控制逆变器 VSG 输出有功/无功功率稳定,加入混合储能单元后,还需对 Boost 电路与 DC/DC 变换器中的直流电压进行控制。

由图 1 可知,VSG 直流侧需提供稳定输出,以保持 U_{vsgdc} 稳定,并通过电压偏差值对蓄电池和超级电容进行功率分配。直流侧电压偏差量参考值 $\Delta U_{\text{vsgdref}}$ 与系统的频率 f 成正比,调节系数为 K_{fv} 。当系统由于负载突增或突降而导致频率的骤降或骤升时,由式(6)可知, $\Delta U_{\text{vsgdref}}$ 也会相应的骤降或骤升,使得储能元件进行相应的放电或充电,恢复系统稳定运行。

$$\Delta U_{\text{vsgdref}} = K_{fv} (f - f_0) \quad (6)$$

下面具体给出所提的含蓄电池 SOC 反馈的 VSG 系统控制策略,将系统的整个运行过程分为蓄电池正常充放电阶段和到达充电上限阶段。

2.1 蓄电池正常充放电

蓄电池处于正常充放电阶段时,所连接的 Boost 电路控制框图如图 3 所示,采用传统的电压外环、电流内环的双环控制,用以维持虚拟同步发电机直流侧电压 U_{vsgdc} 稳定,其中: $U_{vsgdref}$ 是 VSG 直流侧电压参考值; i_L 是蓄电池输出电流。

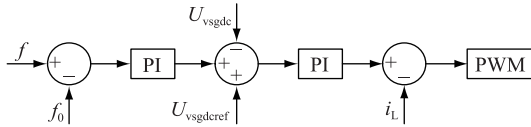


图 3 正常工作 Boost 控制框图

Fig.3 Control block diagram of Boost during normal time

当系统发生功率波动时,由蓄电池和超级电容组成的混合储能单元需在正常工作范围内,释放或吸收多余的功率(式 7),以维持系统稳定。根据储能元件自身特点,功率型元件超级电容充放电速度快,在波动瞬间迅速进行补偿;能量型元件蓄电池由于循环寿命较短,为了限制其充放电功率的变化率,主要补偿低频部分且速度平缓。

$$\Delta P_b + \Delta P_{sc} = \Delta P_{load} + \Delta P_{pv} \quad (7)$$

式中: ΔP_b , ΔP_{sc} , ΔP_{load} 和 ΔP_{pv} 分别为蓄电池、超级电容、负载和光伏的功率变化量。

光伏模块所连接的 DC/DC 电路在蓄电池正常充放电时,通过控制光伏阵列的端电压,使其能够自动地工作在最大功率输出点,始终工作在 MPPT 模式。

2.2 蓄电池达到充电上限

由于在微电网中,分布式电源具有间歇性,负荷具有不确定性。若在某一时刻 t_1 ,蓄电池的充电容量已达到临界,即 $S_{SOC} = S_{max}$,如此时蓄电池继续充电,不改变其工作状态,将会导致储能元件的过充,缩短使用寿命^[26]。为避免这种情况,引入蓄电池 SOC 反馈控制,主要流程如图 4 所示,检测当前时刻蓄电池储能系统的 SOC,令其与上限值 S_{max} 进行比较,以确定 Boost 电路与光伏侧 DC/DC 模块的运行模式。Boost 电路控制框图在图 3 基础上,加入蓄电池 SOC 选择模块: Switch,用于切换蓄电池正常充放电过程与充电达到上限时系统的工作方式,具体如图 5 所示。

由 Switch 模块对系统运行过程中,蓄电池实时 S_{SOC} 数值进行判断,当 $S_{min} < S_{SOC} < S_{max}$ 时,储能元件正常充放电,控制方式如 2.1 中所述。当 $S_{SOC} = S_{max}$ 即蓄电池充电达到上限时,Switch 模块立即切换,输出为 0。此时,蓄电池输出电流 $i_L = 0$,输出功率 $P_{bat} = 0$,对蓄电池进行过充保护,停止继续充电。由于此时 Boost 电路无法维持 VSG 直流侧电压恒定,为使

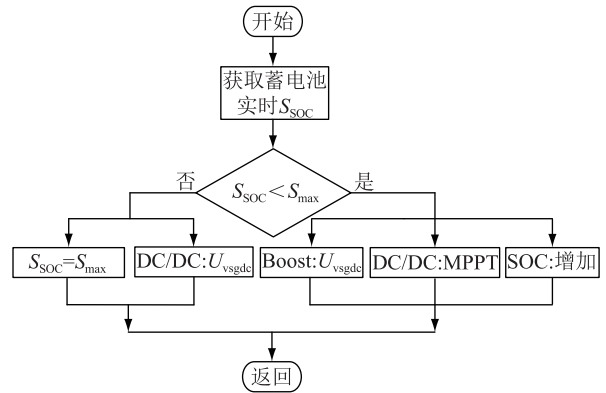


图 4 蓄电池 SOC 反馈控制流程

Fig.4 Flow chart of battery SOC feedback control

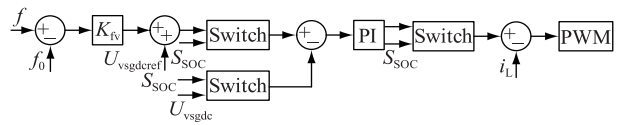


图 5 SOC 反馈控制 Boost 电路控制框图

Fig.5 Control block diagram of Boost with battery SOC feedback

得系统能够稳定运行,需将 DC/DC 模块由正常工作时的 MPPT 模式切换为稳压模式,用以维持 VSG 直流侧电压。其稳压控制方式与蓄电池正常工作时 Boost 电路控制方式相似(如图 6 所示),由直流侧电压偏差量参考值 $\Delta U_{vsgdref}$ 实现储能输出功率的控制。

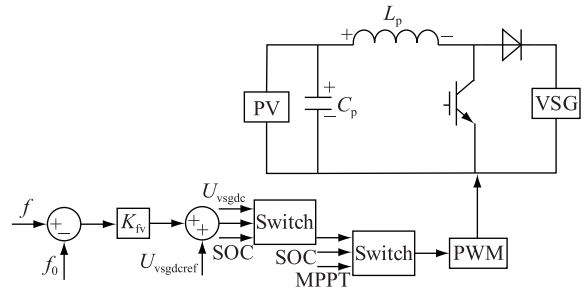


图 6 PV 侧控制框图

Fig.6 Control block diagram of PV

3 仿真结果与分析

为了验证所提出的方法的正确性和有效性,基于图 1 拓扑结构在 MATLAB/SIMULINK 中搭建含储能 SOC 反馈控制的虚拟同步发电机系统仿真模型。

虚拟同步发电机系统直流母线电压 $U_{vsgdref} = 900$ V,系统参数见表 1。光伏电池的参数设置为:开路电压 $U_{oc} = 430$ V;短路电流 $I_{sc} = 31.65$ A;出力最大时电压 $U_m = 350$ V;出力最大时电流 $I_m = 29.55$ A;参数 $a = 0.076$; $b = 3.225$ 。蓄电池在标况下的参数设

置为:标称电压 $U_{\text{bat}} = 500 \text{ V}$;初始 $S_{\text{SOC}} = 79.998\%$;反应时间 $t_{\text{re}} = 30 \text{ s}$ 。将蓄电池 SOC 的上下限分别设置为: $S_{\text{max}} = 80\%$; $S_{\text{min}} = 40\%$ 。

表 1 系统参数

Tab.1 Parameters of the system			
参数	数值	参数	数值
C_{dc}/F	3.6×10^{-3}	K_Q	5×10^{-4}
L_{dc}/H	4×10^{-3}	K_u	3.5×10^{-2}
U_{bat}/V	500	D	10
R_d/Ω	0.3	K_{fv}	16.6
L_d/H	6×10^{-3}	K_p	0.38
U_{ref}/V	381	K_I	40
P_{ref}/kW	5	L_p/H	2×10^{-4}
$Q_{\text{ref}}/\text{var}$	0	C_p/F	2×10^{-4}
$U_{\text{vsgderef}}/\text{V}$	900		

VSG 有功/无功功率参考值分别为 $5 \text{ kW}/0 \text{ var}$, 起初系统正常工作,储能经 Boost 电路升压,使 VSG 直流侧电压稳定在 900 V ,输出有功/无功功率跟随指令值。在 $t = 0.5 \text{ s}$ 时,负载突增,而光伏出力不变,系统频率瞬间下降(图 7)。由于储能放电,系统频率经过骤降后,开始增加。类似于一次调频的有差调节,稳定时,系统频率约为 $f = 49.989 \text{ Hz}$ 。由图 3 可知,VSG 直流侧电压与系统频率成正比,直流侧电压同样先出现瞬时暂降后增加,最后稳定在一个略小于正常工作时 VSG 直流侧母线参考电压 $U_{\text{vsgderef}} = 900 \text{ V}$ 的值,约为 $U_{\text{vsgdc}} = 899 \text{ V}$ (图 8)。

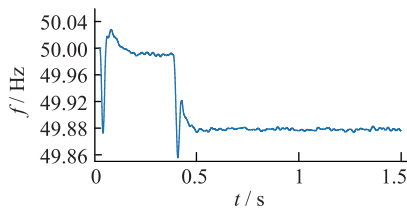


图 7 系统频率波形

Fig.7 System frequency responses output

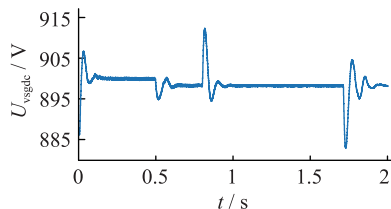


图 8 虚拟同步发电机直流侧电压波形

Fig.8 VSG DC side voltage output

图 9 给出了光伏侧 DC/DC 电路输出波形。将环境温度设为恒定 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,当 $t \in (0, 0.5 \text{ s})$ 时,系统正常工作,该模块运行在 MPPT 模式下,光照强度 $S = 400 \text{ W/m}^2$,输出功率约为 $P_{\text{pv}} = 4.24 \text{ kW}$ 。但由于

$P_{\text{pv}} < P_{\text{vsg}}$,储能需放电来弥补分布式电源出力不足,蓄电池 S_{SOC} 下降(图 10)。

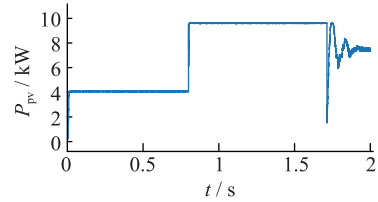


图 9 光伏侧 DC/DC 电路输出功率波形

Fig.9 PV side DC/DC power output

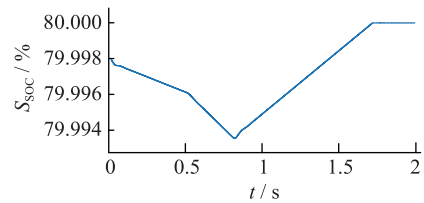


图 10 蓄电池 SOC 波形

Fig.10 Battery SOC output

在 $t = 0.5 \text{ s}$ 瞬间,系统发生功率波动。如图 11 所示,高功率密度的超级电容立刻放电,对系统的功率缺额进行补偿,以维持运行稳定。高能量密度的蓄电池反应速度较慢,放电平滑。当 VSG 直流侧电压稳定时,超级电容的充放电功率 $P_{\text{sc}} = 0$,功率缺额全部由蓄电池进行补偿。由于功率波动,从图 10 可见,当 $t \in (0.5 \text{ s}, 0.8 \text{ s})$ 时, S_{SOC} 下降速率较 $t \in (0, 0.5 \text{ s})$ 更快,但仍处于正常工作范围。

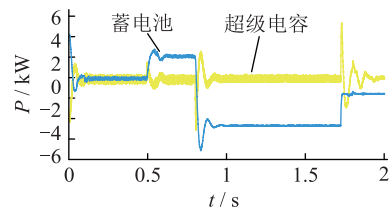


图 11 蓄电池与超级电容功率波动波形

Fig.11 System power responses output

在 $t = 0.8 \text{ s}$ 时,光伏电池的光照强度由 $S = 400 \text{ W/m}^2$ 突变为 $S = 1000 \text{ W/m}^2$ 。由前述 DC/DC 电路控制作用,进行最大功率跟踪,稳态时输出最大功率,由图 9 可见,其值约为 $P_{\text{pv}} = 10.4 \text{ kW}$ 。此时, $P_{\text{pv}} > P_{\text{vsg}}$,分布式电源出力大于负荷所需,储能开始充电。超级电容反应迅速,立刻充电;蓄电池反应速度较慢,充电平滑。稳态时,超级电容充放电功率 $P_{\text{sc}} = 0$;蓄电池持续充电, S_{SOC} 持续增加,直到 $t = 1.7 \text{ s}$ 时, $S_{\text{SOC}} = S_{\text{max}}$,充电停止。

由图 10 可见,所提的带混合储能 SOC 反馈控制的 VSG 系统能很好地保证蓄电池在荷电状态达到上限时,不再进行充电,以避免由于过充导致的

缩短使用寿命。由前述分析可知,此时 DC/DC 模块切换为稳压模式,稳态时,光伏电池输出功率约为 $P_{pv} = 8 \text{ kW}$ 。由于 $P_{pv} > P_{vsg}$,且 S_{SOC} 已到达上限,故将停止继续充电,在 $S_{SOC} < S_{max}$ 之前,始终保持 $S_{SOC} = S_{max}$ 不变。

图 12 给出了系统运行全过程,VSG 输出电压波形,可见在加入蓄电池 SOC 反馈后,由于 Switch 模块的运行切换,使得 VSG 直流侧电压始终维持稳定,输出三相交流电压。

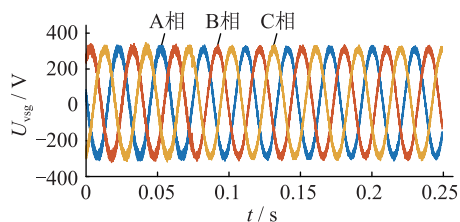


图 12 虚拟同步发电机输出电压波形

Fig.12 VSG output voltage

图 13 给出了系统运行全过程,VSG 输出有功/无功功率波形。当 $t \in (0, 0.5 \text{ s})$ 时,系统正常工作,经过短暂的暂态过程,输出有功/无功功率跟随参考值。在 $t = 0.5 \text{ s}$ 时,由于负荷突增导致系统频率发生波动,经储能放电,系统有功功率重新达到平衡,储能所释放的功率等于负荷增加量。由于有功与频率相关,在对控制方法进行改进时,忽略无功控制模块,VSG 输出无功功率始终跟随指令值,不随系统频率波动而发生改变。

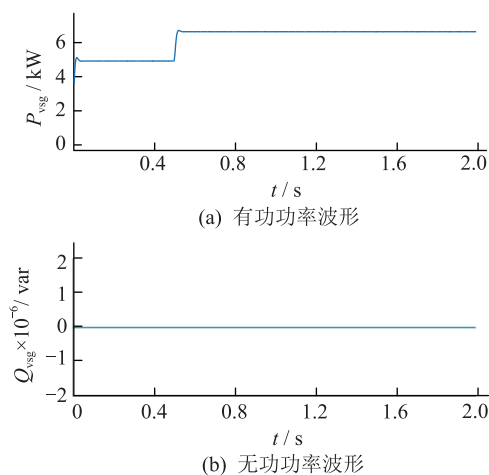


图 13 虚拟同步发电机输出有功/无功功率波形

Fig.13 VSG output active/reactive power

4 结论

本文基于虚拟同步发电机技术,研究了带蓄电池 SOC 反馈的 VSG 系统控制方法,使得分布式电源和负荷在发生功率波动时,通过超级电容补偿高频

功率波动,蓄电池在合理的充放电范围内补偿低频功率波动。由仿真验证了所提出的控制策略在蓄电池处于正常充放电范围和充电达到临界时,均可维持系统稳定运行,得出了以下结论:

(1) 在分布式电源和负荷发生功率波动时,通过 VSG 直流侧电压参考值的调节控制,使得功率波动在蓄电池和超级电容间实现分配,超级电容对系统频率波动快速响应,蓄电池则可平滑地进行充放电。

(2) 当蓄电池处于正常充放电范围时,由混合储能单元连接的 Boost 电路稳定 VSG 直流侧电压,使得 VSG 正常工作;光伏侧的 DC/DC 电路仅用于最大功率跟踪,工作在 MPPT 模式。当蓄电池充电达到上限时,通过切换模块,避免蓄电池过充,由光伏侧的 DC/DC 电路稳定 VSG 直流电压,维持系统正常运行。

(3) 仿真结果验证了所提出的带蓄电池 SOC 反馈的虚拟同步发电机系统控制策略的可行性和有效性,在储能进行平抑系统功率波动的过程中,抑制了过充的发生,保障了蓄电池健康高效的运行,延长了其使用寿命。在今后的研究中,可将超级电容的 SOC 也考虑在内,进一步完善控制策略。

本文得到国网江苏省电力有限公司 2018 年科技项目“微网中虚拟同步机关键技术研究”(J2018056)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] LASSETER R H. Microgrids and distributed generation [J]. Journal of Energy Engineering, 2007, 133(3): 144-149.
- [2] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LYU Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [3] HE J, LI Y W, BOSNJAK D, et al. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2013, 28(1): 234-246.
- [4] BLAABJERG F, TEODORESCU R, LISERRE M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 138-1409.
- [5] ZHONG Q, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [6] 吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 349-360.

- LYU Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-360.
- [7] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
- LYU Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its application in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2519-2603.
- [8] 李日光. 基于 MATLAB-SIMULINK 的虚拟同步发电机控制方法的仿真研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- LI Riguang. Study on control method of virtual synchronous generator by simulation in MATLAB-SIMULINK [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [9] 苏建徽, 汪长亮. 基于虚拟同步发电机的微电网逆变器[J]. 电工电能新技术, 2010, 29(3): 26-29.
- SU Jianhui, WANG Changliang. Virtual synchronous generator based inverter in microgrid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2010, 29(3): 26-29.
- [10] 杨向真. 微网逆变器及其协调控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.
- YANG Xiangzhen. Research on microgrid inverter and coordinated control strategies of multiinverters[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011.
- [11] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generators using a virtual synchronous generator [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.
- [12] 王思耕. 基于虚拟同步发电机的光伏并网发电控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- WANG Sigeng. Control strategy of grid-connected PV power system based on virtual synchronous generator [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [13] 葛平, 杨斌. 固体蓄能供热装置在电能替代工作中的应用研究[J]. 电力需求侧管理, 2016, 18(1): 34-36, 48.
- GE Ping, YANG Bin. Application of solid energy storage heating device in the power substitution work. Power Demand Side Management, 2016, 18(1): 34-36, 48.
- [14] 李旭, 丁勇, 李勇, 等. 虚拟同步发电机的相角控制方法[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 43-46.
- LI Xu, DING Yong, LI Yong, et al. Phase angle control method of virtual synchronous generator [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 43-46.
- [15] 曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 虚拟同步发电机的模型及储能单元优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 22-31.
- ZENG Zheng, SHAO Weihua, RAN Li, et al. Mathematical model and strategic energy storage selection of virtual synchronous generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 22-31.
- [16] 袁敞, 刘昌, 赵天扬, 等. 基于储能物理约束的虚拟同步机运行边界研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 506-515.
- YUAN Chang, LIU Chang, ZHAO Tianyang, et al. Research on operating boundary of virtual synchronous machine based on physical constraint of energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 506-515.
- [17] 刘海涛, 邱丽君, 兰征, 等. 引入储能单元的虚拟同步机研究[J]. 电源学报, 2016, 14(2): 1-8.
- LIU Haitao, QIU Lijun, LAN Zheng, et al. Study on virtual synchronous generator with storage unit [J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(2): 1-8.
- [18] 王超. 考虑储能系统的虚拟同步发电机研究[D]. 济南: 济南大学, 2015.
- WANG Chao. Research for virtual synchronous generator with considering energy storage system [D]. Jinan: Jinan University, 2015.
- [19] 徐岩, 张仰飞, 夏伟栋, 等. 三相 PWM 整流器控制策略研究及参数整定[J]. 浙江电力, 2016, 35(8): 26-30.
- XU Yan, ZHANG Yangfei, XIA Weidong, et al. Research on control strategies of three-phase PWM rectifier and parameter setting [J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(8): 26-30.
- [20] LUKIC S M, CAO J, BANSAL R C, et al. Energy storage systems for automobile applications [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2258-2267.
- [21] ZHOU H, BHATTACHARYA T, TRAN D, et al. Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2011, 26(3): 923-930.
- [22] 王宇. 超级电容与蓄电池混合储能系统的能量管理与控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- WANG Yu. Study on energy management and control of a supercapacitor and battery hybrid energy storage system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [23] 李斌, 宝海龙, 郭力. 光储微电网孤岛系统的储能控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 8-15.
- LI Bin, BAO Hailong, GUO Li. Strategy of energy storage control for islanded microgrid with photovoltaic and energy storage systems [J]. Electric Power Automatic Equipment, 2014, 34(3): 8-15.
- [24] 张国玉, 洪超, 陈杜琳, 等. 面向储能电站调度的光储发电系统运行优化策略研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3): 50-56.
- ZHANG Guoyu, HONG Chao, CHEN Dulin, et al. Strategy research on operation optimization of photovoltaic-energy storage hybrid system based on scheduling of battery energy storage system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3): 50-56.
- [25] FANG Jingyang, TANG Yi, LI Hongchang, et al. A battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for implementing the power management of virtual synchronous generators [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2018, 33(4): 2820-2824.
- [26] 王伟, 薛金花, 叶季蕾, 等. 基于 SOC 调控的用于抑制光

伏波动的电池储能优化控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 75-80.

WANG Wei, XUE Jinhua, YE Jilei, et al. An optimization control design of battery energy based on SOC for leveling off the PV power fluctuation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 75-80.

作者简介:



陈虹妃

陈虹妃(1994—),女,硕士研究生,研究方向为新能源发电(E-mail:lynettechenj@163.com);

张宸宇(1989—),男,博士,工程师,从事电能质量治理及虚拟同步发电机技术工作(E-mail:yu_z@sina.cn);

缪惠宇(1992—),男,博士研究生,研究方向为新能源发电(E-mail:mhy034@163.com)。

Virtual Synchronous Generator System with Battery SOC Feedback Control

CHEN Hongfei¹, ZHANG Chenyu², MIAO Huiyu¹, YANG Yun¹, ZHENG Jianyong¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: In order to better simulate the inertia of the synchronous generator and make full use of the advantages of different energy storage units, a virtual synchronous generator system with a hybrid energy storage unit composed of battery and ultracapacitor is studied and the mathematical model of the system is analyzed in detail. In the control strategy, taking into account the characteristics of the energy storage units themselves and the service life of the battery, a control strategy including battery SOC feedback is proposed. By setting up a corresponding MATLAB/SIMULINK simulation model, the system is analyzed in the normal state of charge and the SOC is reached. At the upper limit, the power distribution of the energy storage verified the correctness and effectiveness of the proposed control strategy. The results show that the proposed virtual synchronous generator system with battery SOC feedback control can achieve a reasonable power distribution when the power fluctuates, and prolongs the service life of the energy storage while maintaining the stability of the system.

Key words: virtual synchronous generator; hybrid storage system; power distribution; state of charge

(编辑 钱悦)