

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221357

基于改进虚拟同步机的光伏混合储能协调控制策略

赵永熹, 于江容

(上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对新能源并网容易引发电压波动、频率震荡等问题,以光储并网系统为研究主体,采用混合储能分频控制策略来提升母线电压动态稳定性,并提出一种改进虚拟同步机控制策略,针对惯性环节参数可灵活调节的特点,对虚拟惯量和参数进行自适应整定,抑制扰动带来的频率和功率振荡。进而建立光储并网仿真模型,在不同工况下验证所提策略不仅能良好地稳定母线电压,补充光伏功率缺额,同时可减缓系统频率突变和减小起调,体现出更友好的并网性能。

关键词: 光储并网系统;改进虚拟同步机;混合储能;频率调节;能量管理

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0219-04

1 引言

传统火电机组随高比例新能源的接入在参与调频的占比日趋减小,其响应速度慢,且受机械器件磨损等作用,影响电网电能质量^[1]。储能技术作为一种早已兴起的技术,相比传统调频电源的高效性,受到广泛关注^[2]。AHAMED M等^[3]提出了一种光储单元并联在直流母线侧稳定直流母线电压的方法,但蓄电池难以同时拥有不同类型储能器件的优点。混合储能系统可弥补单一储能存在的缺陷^[4],如KRISHAN O等^[5]提出一种基于超级电容和蓄电池的新型功率分配算法,但未考虑交流侧并网特性。因双高背景导致的系统惯量减小,虚拟同步发电机(VSG)控制技术备受青睐^[6],如计长安等^[7]采用VSG算法控制逆变器输出有功和无功功率,但未研究惯性环节参数影响。鉴此,针对光伏混合储能并网系统,本文以光伏阵列为主电源,采取一种以超级电容和蓄电池作为混合储能系统的分频能量管理策略,通过二阶低通Butterworth滤波器分隔高频和低频功率信号,实现直流母线稳压控制且有助于延长蓄电池寿命,同时提出了改进VSG控制策略,减小频率超调震荡,并通过仿真分析验证其有效性。

2 光储微网并网结构概述

基于VSG的光伏混合储能并网系统控制结

构见图1。图1中, C_{dc} 为直流母线稳压电容; L 、 C 分别为滤波电感、电容; Z_{line} 为线路阻抗; i_{Labc} 为电感电流; u_c 为电容电压,采集的电压电流送入电压电流双闭环,经SPWM调制生成驱动信号控制逆变器开关; P 、 Q 分别为VSG的输出有功、无功功率; P_{ref} 为有功功率参考值; Q_{ref} 为无功功率给定值; ω_g 为连接公共电网的角频率。

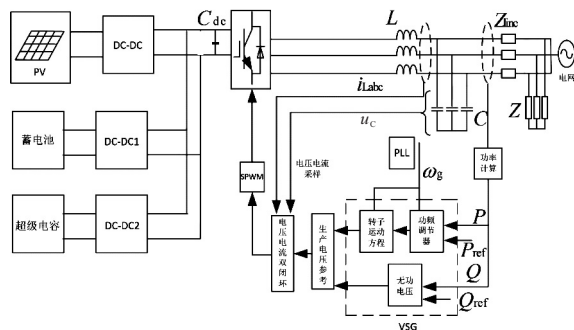


图1 VSG光伏混合储能并网系统控制结构

Fig. 1 Control structure of PV hybrid energy storage grid-connected system based on VSG

光伏阵列采用最大功率控制经DC-DC变流器连接至直流母线,超级电容和蓄电池采用有源式并联拓扑结构连接至直流母线,此种方式可实现蓄电池和超级电容的分别管理,充分发挥各自单元的能量特性,抑制母线电压波动。假设光伏阵列输出为 P_{pv} 、蓄电池输出功率为 P_{bat} 、超级电容输出功率为 P_{sc} ,逆变器采用VSG控制,并引入改进策略,其输出有功功率为 P_{VSG} ,交流侧负

收稿日期: 2022-07-04, 修回日期: 2022-08-04

基金项目: 上海市青年科技英才扬帆计划项目(20YF1414800)

作者简介: 赵永熹(1979-),女,副教授、硕导,研究方向为柔性输电技术和储能技术,E-mail: zhao_yongxi@shiep.edu.cn

载功率为 P_{load} , 流入和流出电网的功率为 P_{grid} , 吸收功率时 P_{bat} 、 P_{sc} 为负, 释放功率时 P_{bat} 、 P_{sc} 为正。稳态时 $P_{pv} = P_{VSG}$, 储能模块不参与系统功率的调节。

根据图 1 可知, 各单元功率满足以下关系:

$$P_{pv} + P_{bat} + P_{sc} = P_{VSG} = P_{grid} + P_{load} \quad (1)$$

3 虚拟同步机模型分析与改进

3.1 虚拟同步机数学模型

三相逆变器采用 VSG 控制, 为避免其高阶复杂性, 采用经典二阶同步机模型, 根据 VSG 的有功-频率下垂特性得到以下表达式:

$$P_m - P_{ref} = K_\omega (\omega_{ref} - \omega_g) \quad (2)$$

式中, P_m 为输入机械功率; K_ω 为有功频率下垂系数; ω_{ref} 为参考角频率; ω_g 为连接公共电网的角频率, 模拟下垂特性, 可通过测量转速偏差控制 VSG 输出功率。

同时引入同步发电机的惯性环节, 使系统具有惯量和阻尼特性, 具备一定的抗干扰能力。其表达式为:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_{ref}}{\omega_g} - \frac{P_e}{\omega_g} - D(\omega - \omega_g) \\ d\theta/dt = \omega - \omega_g \end{cases} \quad (3)$$

式中, P_e 为 VSG 输出电磁功率; J 、 D 分别为 VSG 的虚拟转动惯量、阻尼系数; ω 为 VSG 的实际角频率。

VSG 有功-频率环节见图 2。图 2 中, $\Delta\omega$ 为虚拟转子角度偏移量; θ 为系统功角。

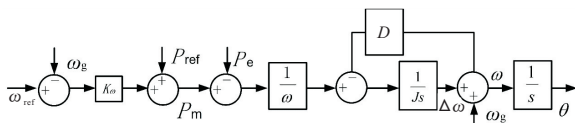


图 2 VSG 有功-频率控制图

Fig. 2 VSG schematic diagram of active frequency modulation control

无功-电压控制部分是模拟同步电机的励磁调节器设计, 具有下垂特性, 通过调节无功功率控制输出电压幅值大小, 使 VSG 具备一次调压特性。其控制方程为:

$$E_0 = U_n + K_Q (Q_{ref} - Q_e) \quad (4)$$

式中, E_0 为输出励磁电动势; U_n 为给定额定电压幅值; K_Q 为无功电压下垂系数; Q_e 为 VSG 实际输出无功功率。

根据表达式建立 VSG 无功电压控制环节见图 3。

3.2 改进 VSG 控制

同步发电机的转动惯量为定值, 不能实时改

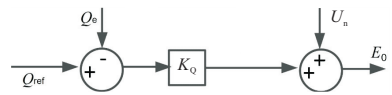


图 3 VSG 无功-电压控制图

Fig. 3 VSG schematic diagram of reactive voltage modulation control

变, 相比之下 VSG 算法的转动惯量和阻尼系数可变, 取值相对灵活, 阻尼系数 D 保持不变时, 转动惯量 J 在系统稳定范围内越大, 角速度变化率 $d\omega/dt$ 越小, 频率变换越缓慢, 转动惯量 J 保持不变时, 阻尼系数 D 在稳定范围内越大, 角速度偏差 $\Delta\omega$ 越小。为了提高 VSG 的动态调节能力, 采用改进的 VSG 控制策略, 自适应调整转动惯量和阻尼系数, 更好地抑制频率变化率和偏差, 提高系统稳定性。

图 4 为同步机功角和转子角频率曲线。图 4 中, 将功角和转子角频率分为几个区间, 即 $a \sim b$: $t_1 \sim t_2$ 、 $b \sim c$: $t_2 \sim t_3$ 、 $c \sim b$: $t_3 \sim t_4$ 、 $b \sim a$: $t_4 \sim t_5$, 其中, 在 $a \sim b$ 区间, 系统功率从 P_1 增至 P_2 , $d\omega/dt$ 变化较大, ω 大于电网角频率 ω_g , 且差值 $\Delta\omega$ 一直增大, 此时要防止 $d\omega/dt$ 和 $\Delta\omega$ 过大影响系统稳定, 需增加 J 和 D 抑制其变化; 在 $b \sim c$ 区间, 系统功率从 P_2 增至 P_3 , ω 仍大于电网角频率 ω_g , 但差值 $\Delta\omega$ 在减小, $d\omega/dt \leq 0$, 角速度变化率逐渐减小, 需减小 J 来增强 $d\omega/dt$, 同时增大 D 抑制 $\Delta\omega$ 突变。区间 $c \sim b$ 、 $b \sim a$ 的分析与 $a \sim b$ 、 $b \sim c$ 类似。

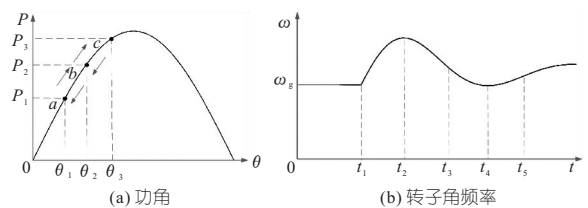


图 4 同步机功角和转子角频率曲线

Fig. 4 Power angle and rotor angular frequency curve of SG

J 和 D 自适应原则见表 1。

表 1 J 和 D 在不同区间的选取原则

Tab. 1 Rule of J and D in different intervals

区间	$\Delta\omega$	$d\omega/dt$	$\Delta\omega (d\omega/dt)$	J	D
$a \sim b$	>0	>0	>0	增大	增大
$b \sim c$	>0	<0	<0	减小	增大
$c \sim b$	<0	<0	>0	增大	增大
$b \sim a$	<0	>0	<0	减小	增大

分析可知, 同时考虑若干因素会增加控制的复杂性, 达不到简便、有效的效果, 因此对 J 和 D 的选取原则进行简化处理, 得到自适应控制方程为:

$$J = \begin{cases} J_0 & \Delta\omega(\frac{d\omega}{dt}) \leq 0 \cup |\frac{d\omega}{dt}| \leq M_j \\ J_0 + \frac{K_j}{T_s + 1} \left| \frac{d\omega}{dt} \right| & \Delta\omega \frac{d\omega}{dt} > 0 \cap \left| \frac{d\omega}{dt} \right| > M_j \end{cases} \quad (5)$$

$$D = \begin{cases} D_0 & |\Delta\omega| \leq M_d \\ D_0 + K_d |\Delta\omega| & |\Delta\omega| > M_d \end{cases} \quad (6)$$

式中, J_0 、 D_0 分别为初始稳定运行时的转动惯量、阻尼系数; K_j 为转动惯量的调节系数; T_s 为惯性时间常数; M_j 、 M_d 分别为条件阈值; K_d 为阻尼调节系数。

4 混合储能分频控制策略

并网模式下, 光伏电源和储能装置起到供给负载消耗和送电上网的作用, 离网状态则需维持系统电压和频率稳定。电源侧或负载侧发生突变, 由储能系统动作补偿缺失的功率, 但单一储能装置难以应对系统中迅速的功率改变。

考虑混合储能装置来应对系统中的功率变化, 利用超级电容功率密度大的特点, 迅速补偿负载突变引发的功率变化分量, 蓄电池则可缓慢应对低频分量变化, 控制其充放电速率, 有利于延长电池循环使用寿命。

从工程角度来说, 各省出台的措施大多数要求光伏储能的配比不低于 10%, 配置适当容量的混合储能系统具有十分重要的现实意义, 合理的混合储能配置占比既可达到协调控制的要求, 又可控制整个光伏系统的成本, 可从功率分配、容量优化配置和不同的优化目标的角度出发, 采用合理的功率分配控制策略和适合的算法优化配比, 考虑不同评价指标的同时实现削峰填谷, 减小弃光、平抑光伏波动, 为新型电力系统的稳定运行提供保障。

混合储能系统分频控制结构见图 5。图 5 中, u_{dcref} 为直流母线电压参考值; u_{dc} 为直流母线电压值; I_{L_ref} 为二阶 Butterworth 低通滤波器的电流低频信号; I_{b_err} 为蓄电池未补偿电流; V_{bat} 为

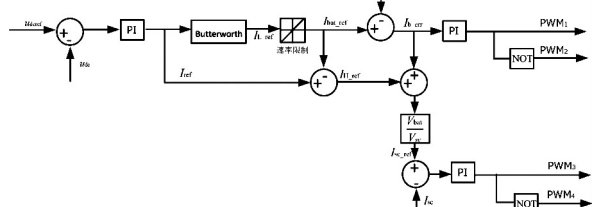


图 5 混合储能系统分频控制结构图

Fig. 5 Energy management control strategy for hybrid energy storage system

蓄电池端电压。对储能模块采用电压电流双闭环控制方式, 控制直流母线电压和 Buck-boost 电路充放电电流, 当负载和光伏电源出力发生变化时, 实现快速应对突变和稳定直流母线电压的作用。考虑超级电容和蓄电池的响应速率和动态性能指标, 选择设计截止频率为 4π rad/s 的二阶 Butterworth 低通滤波器^[8] 阻断电流环 I_{ref} 中的电流高频信号 I_{H_ref} 。通过速率限制器限制其蓄电池的充放电电流速率, 得到蓄电池充放电参考电流 I_{bat_ref} 后, 与实际电流 I_{bat} 的差值送入 PI 控制器, 经 PWM 调制得到开关脉冲控制信号。

而超级电容电流的高频分量为:

$$I_{H_ref} = I_{ref} - I_{bat_ref} \quad (7)$$

由于蓄电池充放电较平缓, 无法立刻追踪参考电流 I_{bat_ref} , 未补偿的蓄电池功率 P_B 为:

$$P_B = (I_{H_ref} + I_{b_err}) V_{bat} \quad (8)$$

式中, V_{bat} 为蓄电池端电压。

由超级电容来补偿蓄电池未瞬时补偿的功率和高频功率分量, 得到超级电容的参考电流 I_{sc_ref} 为:

$$I_{sc_ref} = P_B / V_{sc} = (I_{H_ref} + I_{b_err}) V_{bat} / V_{sc} \quad (9)$$

式中, V_{sc} 为超级电容端电压。

超级电容参考电流 I_{sc_ref} 与实际电流 I_{sc} 的差值经 PI 控制器补偿, 经 PWM 发生器得到脉冲开关控制信号。

5 仿真分析

为验证本文结构控制效果, 在 MATLAB/simulnk 中搭载如图 1 所示的 VSG 的光伏混合储能并网系统结构的仿真模型, 选用额定电压为 360 V、额定容量为 10 Ah 的蓄电池, 额定电压为 400 V、额定容量为 60 F 的超级电容, 其他相关仿真参数见表 2。

表 2 仿真相关参数

Tab. 2 Simulation parameters

参数	单位	取值	参数	单位	取值
直流母线电压 u_{dc}	V	800	J_0	kg/m ²	0.187
电网线电压 U_g	V	380	D_0	N · m · s/rad	1.6
滤波电感 L	mH	1.6	M_j		7.5
滤波电容 C_{dc}	μF	20	K_j		0.2
开关频率 f_s	kHz	5	T_s		5.6
直流母线电容 C	mF	15	K_d		3.2
储能电感 L_B	mH	20	M_d		0.2

5.1 改变光照强度的仿真结果

系统工作在并网状态, VSG 输出初始有功功率指令值为 15 kW, 即 $P_{ref} = P_{VSG} = 15$ kW, 负载为 10 kW, 初始光照强度为 1 000 W/m², 环境温

度维持在 25 ℃,光伏发电单元采用扰动观察法 MPPT 控制, $t=0.5、1.0、1.5$ s 时改变光照强度为 1 200、1 000、800 W/m², 分别对应 $P_{pv} > P_{ref}$ (0.5~1.0 s)、 $P_{pv} = P_{ref}$ (1.0~1.5 s)、 $P_{pv} < P_{ref}$ (1.5~2.0 s)。仿真结果见图 6。

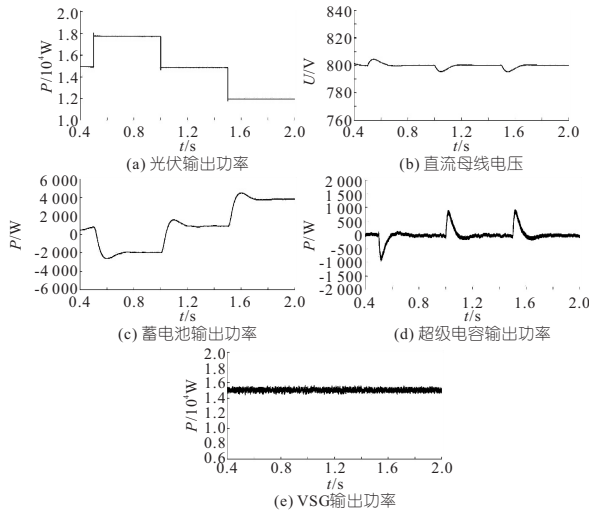


图 6 改变光照强度时仿真结果

Fig. 6 Simulation results of changing light intensity

由图 6 可知,在 0~0.5 s 时,光照强度维持在 1 000 W/m²,VSG 输出功率 $P_{VSG} = 15$ kW,光伏输出功率 P_{pv} 约为 15 kW, $P_{VSG} = P_{pv}$,蓄电池输出功率 P_{bat} 与超级电容输出功率 P_{sc} 代数和 在误差范围内近似为 0 kW,验证了 $P_{pv} + P_{bat} + P_{sc} = P_{VSG}$ 的正确性;在 0.5 s 时光照强度突增至 1 200 W/m²,光伏出力 P_{pv} 增至约为 18 kW,这时由于 P_{pv} 大于 P_{VSG} ,储能单元发挥作用,蓄电池充电,蓄电池与超级电容吸收的功率在误差范围内近似为 3 kW,在 1 s 时光照强度降至 1 000 W/m²,与 0.5 s 之前类似,不再重复说明;在 1.5 s 时光照强度突降至 800 W/m²,光伏输出功率 P_{pv} 约为 12 kW,这时由于 P_{pv} 小于 P_{VSG} ,蓄电池放电,蓄电池与超级电容 P_{sc} 释放的功率在误差范围内近似为 3 kW,补充光伏缺额功率。

由此可知,混合储能分频控制策略使超级电容平抑高频光伏出力突变,蓄电池则可缓慢应对低频功率变化,对蓄电池的持续使用寿命起到了保护效果,同时可维持直流母线电压的动态稳定,验证了混合储能分频控制策略的控制效果。

5.2 改变功率指令和负载大小的仿真结果

光伏阵列保持光照强度在 1 000 W/m²,环境温度维持在 25 ℃,初始有功功率指令值 $P_{ref} = P_{VSG} = 15$ kW,负载为 10 kW,在 $t=0.8、1.2$ s 时改变 P_{ref} 为 17、13 kW,在 1.5 s 时,增加负载 2 kW。仿真结果见图 7。

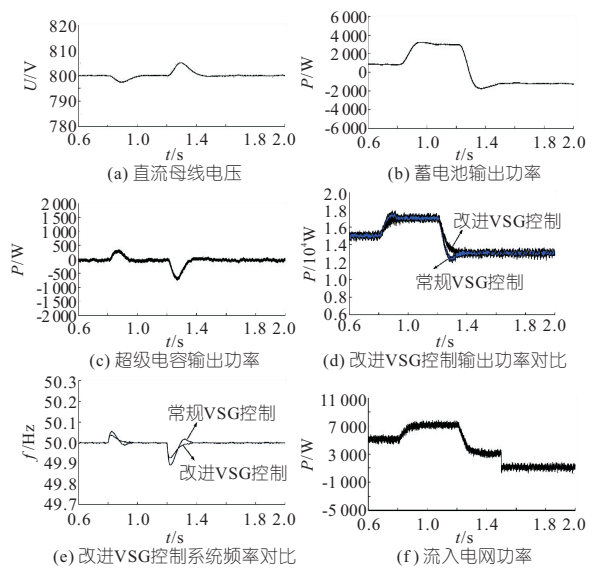


图 7 改变有功指令和负载时仿真结果

Fig. 7 Simulation results when changing active power reference and load

由图 7 可知,在 0~0.8 s 时,VSG 输出功率 $P_{ref} = P_{VSG} = 15$ kW,光伏输出功率 P_{pv} 约为 15 kW, $P_{VSG} = P_{pv}$,0.8 s 时有功功率指令值变为 17 kW, P_{pv} 小于 P_{VSG} ,储能单元发挥作用,蓄电池放电,蓄电池与超级电容释放的功率近似为 2 kW, P_{VSG} 比负载功率 P_{load} 多 7 kW,因此流入电网的功率 $P_{grid} = 7$ kW;在 1.2 s 时有功功率指令值变为 13 kW,这时由于 P_{pv} 大于 P_{VSG} ,蓄电池充电,蓄电池与超级电容 P_{sc} 吸收的功率近似为 2 kW,补充光伏缺额功率,同理流入电网的功率为 3 kW,在 1.5 s 时负载增至 12 kW, $P_{ref} - P_{load} = 1$ kW,因此流入电网的功率 $P_{grid} = 1$ kW,验证了 $P_{VSG} = P_{grid} + P_{load}$ 的正确性。由图 7(d)、(e) 可知,改进 VSG 控制策略在功率指令突变时,超调量比常规 VSG 控制要小,频率波动也更平缓,仿真也验证了改进 VSG 策略有助于抑制频率震荡,有助于提高系统稳定性。

6 结论

a. 以光伏混合储能并网系统为例,考虑蓄电池和超级电容各自特性,提出了混合储能单元分频能量管理策略,实现混合储能的优势互补,有助于延长蓄电池寿命,仿真验证了应对外界突增干扰的稳定母线电压的有效性。

b. 提出了改进的 VSG 控制策略,给出了自适应函数表达式,可有效减小系统超调量,对抑制频率快速突变效果良好,有助于系统平稳运行。

参考文献:

[1] 靳宏,金龙,徐志科. 干式变压器高压绕组电场有限元分析[J]. 水电能源科学,2012,30(3):173-176,135.

[2] 蒋志勇. 典型结构的环氧浇注干式变压器漏磁场仿真与分析[J]. 变压器, 2017, 54(1):32-37.

[3] WANG Y, FENG C, FEI R, et al. Thermal-ageing characteristics of dry-type transformer epoxy composite insulation[J]. High performance polymers,

2020, 32(6):095400832090643.

[4] 李周晨昕,袁鑫锋,徐鹏,等. 干式变压器短路故障前后负载振动特性分析[J]. 变压器,2020,57(2):31-38.

[5] 田慕琴,朱晶晶,宋建成,等. 基于流固耦合分析的矿用干式变压器温度场仿真[J]. 高电压技术,2016, 42(12):3972-3981.

[6] 戚日常,张冰倩,刘兴华,等. 应用有限元分析电力变压器绕组匝间短路的暂态特征[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(10): 130-138.

Electromagnetic Characteristics and Electrodynamic Analysis of Dry-type Transformer Winding Interturn Short Circuit Fault

HAO Yan¹, XIAN Ri-chang¹, HU Yu-yao¹, ZHANG Hai-qiang², GUO Yang¹, LI Jia-qi¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. Zibo Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Zibo 255000, China)

Abstract: The low voltage winding interturn insulation fault of dry-type transformer is not easy to find directly through the appearance of the phenomenon, and is difficult to real-time monitoring, seriously affecting the safe and stable operation of power systems. In view of the lack of fault detection methods due to insufficient research on the electromagnetic characteristics of single-turn interturn short-circuit faults in low-voltage windings of dry-type transformers, and the difficulty in setting interturn short-circuit faults in practical projects, finite element simulation software was used to establish a field-circuit coupling model which is consistent with the actual dry-type transformer, and the accuracy of the model was verified under rated operating conditions. On this basis, the variation rules of electromagnetic parameters of short-circuit turns at different positions were explored when interturn short-circuit faults occur in low-voltage windings. The distribution of electromagnetic force on short-circuit turns when interturn short-circuit faults occur in windings at different positions was simulated. The results show that when the interturn short circuit occurs at different positions of the winding, the maximum magnetic density appears in the outermost short-circuit turn; the outermost short-circuit turn is subjected to the largest radial force, and the innermost short-circuit turn is subjected to the largest axial force. Therefore, it provides a theoretical basis for on-line monitoring and protection technology of dry-type transformer interturn insulation, which is conducive to the research and implementation of measures to improve short-circuit resistance.

Key words: dry-type transformer; finite element simulation; interturn short circuit; electromagnetic characteristics; electric power

(上接第 222 页)

参考文献:

[1] 李欣然,黄际元,陈远扬,等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016,44(7):145-153.

[2] 李建林,马会萌,惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报,2016,31(14):1-10,20.

[3] AHAMED M, DISSANAYAKE U, SILVA H, et al. Modelling and simulation of a solar PV and battery based DC microgrid system[C]// International Conference on Electrical. IEEE,2016: 1706-1711.

[4] 张纯江,董杰,刘君,等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报,2014,29(4):

334-340.

[5] KRISHAN O, SUHAG S. A novel control strategy for a hybrid energy storage system in a grid-independent hybrid renewable energy system[J]. International transactions on electrical energy systems, 2020,30(4):e12262.

[6] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-348.

[7] 计长安,李伟,罗亚桥,等. 储能系统逆变器虚拟同步机控制算法研究[J]. 水电能源科学,2018,36(1): 200-202,52.

[8] 陈燕东,谭文娟,周小平,等. 混合储能系统功率自主分频控制方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019,46(4):65-73.

Coordinated Control Strategy of Photovoltaic Hybrid Energy Storage Based on Improved Virtual Synchronous Generator

ZHAO Yong-xi, YU Jiang-rong

(College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: New energy grid connection is easy to cause voltage fluctuation, frequency oscillation and other problems. For this, the paper adopts a frequency division control strategy of hybrid energy storage unit, which based on the storage of photovoltaic grid-connected system as the research subject, thus improving the dynamic stability of DC bus voltage, and proposes an improved virtual synchronous generator. According to the characteristics of flexible adjustment of inertia parameters, the virtual inertia and parameters are adjusted adaptively to suppress the frequency and power oscillation caused by the disturbance. Finally, a simulation model of photovoltaic storage grid-connection is established. It verifies that the proposed strategy can not only stabilize the DC bus voltage and supplement the power deficiency under different operating conditions. At the same time, it can slow down the sudden change of the system frequency and reduce the overshoot, showing good grid-connected performance.

Key words: photovoltaic storage and grid-connected system; improved virtual synchronous generator; hybrid energy storage; frequency regulation; energy management