

## 储能辅助电网参与调频的控制策略研究

黄 荣, 郭家虎

安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

**摘要:**目的 研究储能电站在风光发电情况下保持电力系统稳态的调节原理与方法, 并在此基础上设计了一种虚拟同步发电机三级模型用有源支持控制方式辅助火电机组维持电网频率稳定的主动支撑控制策略。方法 利用储能电池快速响应的特性, 建立储能系统, 对储能换流器的控制进行改进, 在传统的控制架构的基础上改进为在电压中加入虚拟阻抗的外环调节器和基于准 PR 控制器的电流内环控制, 深入分析控制策略的原理和同步发电机的对应关系。结果 随着新能源渗透率越来越高, 在储能电站并网参与频率调节的情况下, 频率波动的次数变少。结论 控制方法可以给新能源发电系统带来一定的惯性和阻尼, 从而增强了系统的稳定性, 并且证明了储能电站参与电网调频的必要性和可实施性, 为储能电站的分布和储能电池的容量配置提供了一定的实际的参考意义。

**关键词:** 主动支撑; 虚拟同步发电机; 储能系统; 储能换流器

中图分类号: TM743 文献标识码: A doi: 10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0002.002

### Research on the Control Strategy of Energy Storage System Assisting Grid in Regulating Frequency

HUANG Rong, GUO Jiahu

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science & Technology, Anhui Huainan 232001, China

**Abstract: Objective** The regulation principles and methods of energy storage power plants to maintain the steady state of the power system in the case of wind and solar power generation were investigated, and on this basis, an active support control strategy of virtual synchronous generator three-level model assisting thermal power units to maintain the frequency stability of the grid with active support control was designed. **Methods** Using the characteristics of the fast response of energy storage batteries, an energy storage system was established to improve the control of the energy storage converter. The conventional control architecture was improved by adding an outer-loop regulator with virtual impedance in the voltage and introducing a current inner-loop control based on a quasi-PR controller. The principle of the control strategy and the correspondence of the synchronous generator were analyzed in depth. **Results** With the increasing penetration of new energy into the grid, the number of frequency fluctuations becomes less when energy storage power stations are connected to the grid to participate in frequency regulation. **Conclusion** This control method can bring a certain amount of inertia and damping to the new energy power generation system, thereby enhancing the stability of the system. It also provides the necessity and feasibility of energy storage stations participating in grid frequency modulation, and provides a certain practical reference significance for the distribution of energy storage stations and the capacity allocation of energy storage batteries.

**Keywords:** active support; virtual synchronous generator; energy storage system; energy storage converter

## 1 引言

最近几年, 随着全球经济的快速发展, 与之相伴的

全球气候变暖、传统能源匮乏等问题也愈演愈烈<sup>[1-2]</sup>, 在此背景需求下, 风能、光能等可再生能源受到了广泛

收稿日期: 2022-11-07 修回日期: 2023-03-15 文章编号: 1672-058X(2024)02-0009-09

基金项目: 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室开放课题资助(2020AC01)。

作者简介: 黄荣(1997—), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 从事储能研究。

引用格式: 黄荣, 郭家虎. 储能辅助电网参与调频的控制策略研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2024, 41(2): 9-17.

HUANG Rong, GUO Jiahu. Research on the control strategy of energy storage system assisting grid in regulating frequency[J].

Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(2): 9-17.

的关注,为降低环境污染等问题带来的影响,传统的发电机组逐渐被新能源所代替,由于其具有波动性等特点,虽然缓解了传统能源稀缺等问题,但也对电网的稳定运行带来了挑战。由于新能源渗透率越来越高,而新能源无法直接并网,需要通过电力电子设备才能间接并网,但是设备不具备惯量等特性,从而为电网的稳定运行带来了挑战。储能系统应运而生,又因为传统机组其本身的内在的缺点,比如响应速度慢,输出精度低,设备容易磨损等,会降低其调频效果,而能量存储系统自身的特点是:响应速度快、跟踪精度高、能够实现能量的双向控制,所以在储能系统的辅助下火电机参与调频的控制方法得到了广泛的应用<sup>[5-6]</sup>。

储能系统是储能电池接入电网的关键设备,对于储能电池的控制策略并不是直接对电池进行控制,而是间接对储能电池并网所用到的电力电子设备进行控制,其控制方式主要有下垂控制(DROOP 控制)和虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制等。其中 VSG 控制以模拟同步发电机的外部特征为主,将传统发电机的机械和电气的控制结构嵌入并网逆变器的控制算法中,改善储能换流器(Power Conversion System, PCS)的外特性<sup>[7-8]</sup>。

文献[9]提出了以同步机三阶模型为基础的主动支撑控制策略,从而增强了储能变流器并网时暂态电压的稳定性,但是所提出的模型较为复杂,模拟的速度较为缓慢。文献[10]在 VSG 的基础上进行改进,利用 VSG 技术集成了储能系统自身的制约以及调频时虚拟惯量的变异特征,对控制参数进行了最优设计,并给出了最优的控制方法。但是对于储能系统只考虑了一台,与实际情况有一定偏差。文献[11]将二阶同步发电机的本体模型引入 VSG 控制模型中,并设计了 VSG 的有功-频率、无功-电压功控制器,获得了能够实现一次调频调压,并具有同步发电机惯性的结果和 VSG 的阻尼算法,对于储能系统的多机并联没有考虑进去,与实际情况有一定的偏差。文献[12]利用 Runge-Kutta 算法对 VSG 的瞬态稳定性进行了分析,提出从限制截断角度和其时间两方面进行优化,但计算比较繁琐。文献[13]对 VSG 技术在微电网中的应用进行研究,完成了 VSG 的机械方程、电磁暂态方程以及初级频率调压方程,并基于模型对 VSG 算法搭建了控制架构框图。文献[17]中的逆变器在并网的控制策略的基础上加入了模型预测,提高了电流的跟踪精度,使得弱电网实现平滑并网,但缺乏对于逆变器本身控制策略的改进。

在上述理论的基础之上,根据同步发电机的数学模型,通过模拟其励磁控制原理及结构,并且与储能系

统的 VSG 二阶模型相结合,建立起具有暂态电压调节过程的 VSG 的三阶模型,在 VSG 三阶模型的基础上,提出了一种以 VSG 三阶模型为基础,用于辅助火电机维持电网频率以及并网电压稳定的主动支撑控制策略,从而使策略不但具备了调频的功能,同时也具有了调压的作用,增加了电力系统的惯量与阻尼特性,提高了系统的稳定性,改善了系统的频谱特征。

## 2 基础原则

### 2.1 同步发电机的工作原理

#### 2.1.1 有功-频率控制原理

同步发电机的有功-频率控制原理主要是指在调速系统的作用下,通过改变进气量或者进水量,使得输出的机械功率和电磁功率相等,进而使得频率逐渐恢复到额定值,从而达到调频的目的<sup>[14]</sup>。同理,当负荷在某一时刻突然减少时,与上述操作相反,使得输入的机械功率减少即可,具体如图 1 所示。

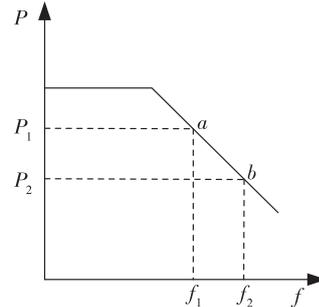


图 1 同步发电机的有功-频率特性曲线

Fig. 1 The active-frequency characteristic curve of the synchronous generator

曲线又被称为功率-频率静态特性曲线,由图 1 可知若发电机初始化运行 a 点,此时频率是  $f_1$ ,发电机输出的电磁功率为  $P_1$ ,则当负荷突然减少时,电磁功率减少,对应图中的点  $P_2$ ,频率升高为  $f_2$  点,体现出了同步发电机的垂度调整控制特性,由此可以得同步发电机多用途的功频稳态方程:

$$P_0 - P_r = -K_r(\omega_0 - \omega_r) \quad (1)$$

其中: $P_0$  为额定机械功率, $P_r$  为发电机的电磁功率, $K_r$  为频率调节系数, $\omega_0$  为系统的额定角速度, $\omega_r$  为系统当前的角速度。方程体现了当系统角速度或者频率发生变化时系统输出的有功功率也会随之变化。

#### 2.1.2 无功-电压控制原理

电压同频率都是衡量电能质量的重要指标,要想维持电压恒定,就需要保证发出的无功功率等于在维持的某个电压消耗的无功功率,此时需要在发电机中加入无功-电压控制环节,也就是所谓的励磁控制器,进而维持端电压的稳定,从而达到调压的目的。如图 2 所示。

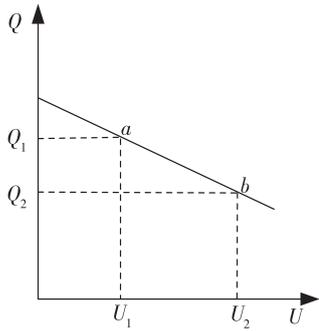


图 2 同步发电机的无功-电压特性曲线

Fig. 2 Reactive-voltage characteristic curve of the synchronous generator

由图 2 可知,当发电机初始化运行在  $a$  点,此时端电压为  $U_1$ ,发电机输出的无功功率为  $Q_1$ ,当系统中的负荷突然减少时,电压会增加至  $U_2$ ,此时励磁电流减少,此时无功功率减少至  $Q_2$ ,过程体现出了同步发电机的无功-电压特性,如式(2)所示:

$$Q_0 - Q_r = -K_b(U_0 - U_r) \quad (2)$$

其中: $Q_0$  为额定无功功率, $Q_r$  为实际的无功功率, $K_b$  为该特性的下垂系数, $U_0$  为发电机的额定电压, $U_r$  为实际工作时的电压。

### 2.1.3 相关三阶模型

从文献[16]中可以得出三阶的同步发电机如下模型:

$$\begin{cases} u_d = x_q i_q - r_a i_d \\ u_q = E'_q - x'_d i_d - r_a i_q \\ pT'_{d0} E_q = E_f - E'_q - (x_d - x'_d) i_d \\ T_J d\omega/dt = T_m - [E'_q i_q - (x'_d - x_q) i_d i_q] \\ d\delta/dt = \omega - 1 \end{cases} \quad (3)$$

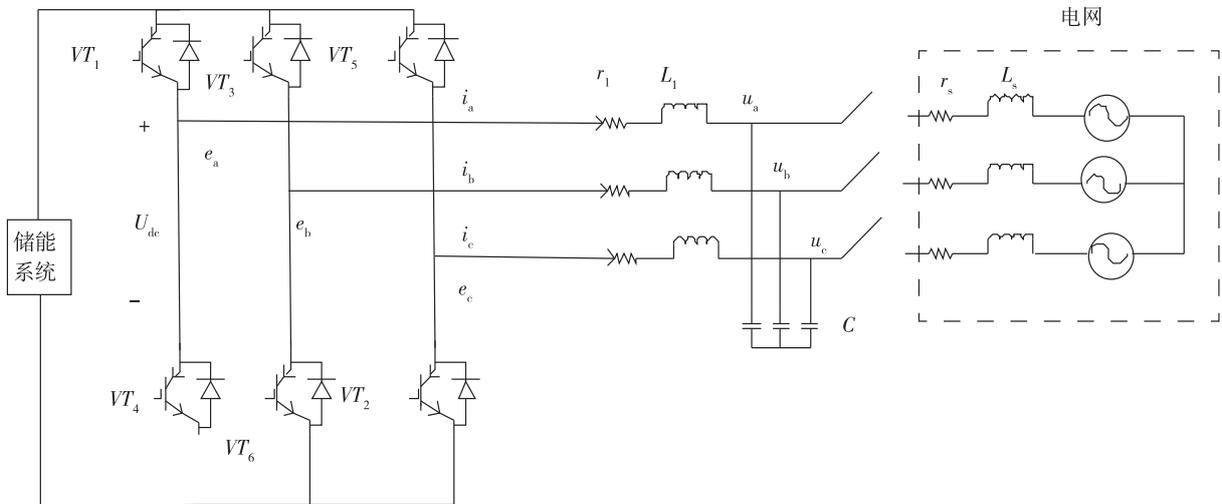


图 4 储能系统通过 VSG 技术并网结构模型

Fig. 4 Grid-connected structure model of energy storage system through VSG technology

其中: $u_d$  为直轴的定子电压, $u_q$  为交轴的定子电压, $x_q$  为定子交轴绕组的标么值, $p = d/dt$  为对时间的导数算子, $i_d$  和  $i_q$  为直、交轴电流, $T'_{d0}$  为时间常数, $\omega$  为角速度, $T_m$  为机械转矩, $T_e$  为电磁转矩, $\delta$  为功角, $E'_q$  和  $E_q$  分别为交轴暂态电动势和稳态电动势, $x'_d$  和  $x_d$  分别为直轴瞬变电抗和同步电抗, $r_a$  为定子各相绕组的电阻, $E_f$  为定子励磁电动势, $T_J$  为同步发电机组的惯性时间常数。

### 2.2 VSG 的整体结构

由于研究主要是利用 VSG 技术对逆变器的控制策略进行优化,所以需要研究储能系统并入电网中的 VSG 结构,以及在稳定状态下与同步发电机的等值电路的一一对应关系,具体如图 3 所示。

图 4 通过比较储能系统并网变流器的主电路拓扑结构和稳态下的同步发电机等效回路,可以发现  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  为 PCS 的中点电压,模拟同步发电机的电势  $E_q$ , $r_1$  为等效电阻, $L_1$  为滤波电感,分别相当于同步发电机的同步电感和定子电阻, $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  为电容电压,相当于同步发电机端电压  $U_g$ 。通过二者的比较,发现了二者之间的相似和对应关系,为后续 VSG 三阶模型的建立提供了可能。

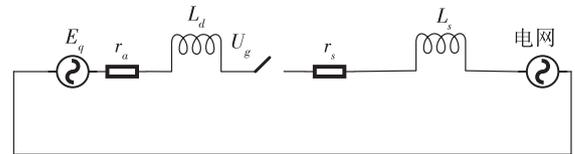


图 3 稳态下的同步发电机等效回路

Fig. 3 Equivalent loop of synchronous generator in steady state

### 3 主动支撑控制策略的优化设计

以 VSG 三阶模型为基础,结合储能系统保持电力系统的调频、调压能力的支撑控制策略,对同步发电机的外部特征进行了严格的模拟,使得储能电站的虚拟调速系统和虚拟励磁系统的时间尺度与同步发电机的调节时间尺度相一致,使得控制策略与传统锁相环的控制策略相比增加了主动性和抗干扰性,主要是因为 PCS 的功角控制不再依赖于电网的角速度。其模型包括虚拟励磁控制器,虚拟调速控制器, VSG 三阶模型以及底层控制模型。

#### 3.1 储能电站模型构造

在提出储能电站的控制策略之前,首先要对其进行分析,建立相应的模型。所谓电站就是首先将  $a$  个储能电池串联,形成一个电池模块,再将  $b$  个电池模块串联构成一个电池柜,再将  $m$  个电池柜并联构成一个存储系统,最终并联  $n$  个储能系统便构成一个存储电能的电站,所以对于储能电站的模型构建实际上就是对储能电池模型的构建。

对于储能电池的选择多种多样,主要以铅酸电池和锂电池为主,由于铅酸电池的寿命较短,体积较大,而锂电池具有效率高,循环寿命长且无污染等特点,使得锂电池更具有发展前景,因此选择锂电池进行研究,阐述储能电池模型构造。

在进行调频时,储能系统的调频的一般模型不能反映出其内部的调频特征。并不适用于调频,为了解决这一问题,国外开始逐步采用戴维南等效电路模型,模型又分为 I 型和 II 型, I 型虽然解决了上述问题,但是电网调频不能将其输出模式与其状态相关联,也不能应用于电网频率调整,而 II 型在蓄电池中,电流被用来作为一个控制信号,并且考虑了蓄电池中的 SOC 对开路电压的影响,便可解决 I 型带来的问题,其戴维南等效电路模型 II 型如图 5 所示。

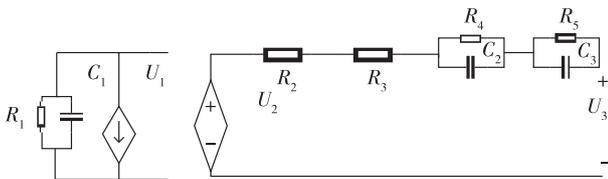


图 5 储能电池戴维南等效电路模型( II 型)

Fig. 5 Thevenin equivalent circuit model of energy storage battery (type II)

由图 5 可以看到左侧图形体现出了储能电站的荷电状态 SOC 随时间的变化,其中  $C_1$  为可用的剩余容量,  $R_1$  为自动放电的电阻,  $U_1$  为目前的荷电状态,反映出了右侧电路上储能电池的电压和荷电状态之间的关系,  $U_2$  为开路电压,  $U_3$  就是储能电池的电压,  $R_2$  为电池自身的电阻,  $R_3$  为储能电池由于不断的充放电而形成的电阻,而  $R_4, R_5, C_2$  和  $C_3$  分别是电阻电容网络中短时和长时响应支路电阻和响应支路电容。

综上所述,便可得到储能电池参与调频的等效模型框图,如图 6 所示。

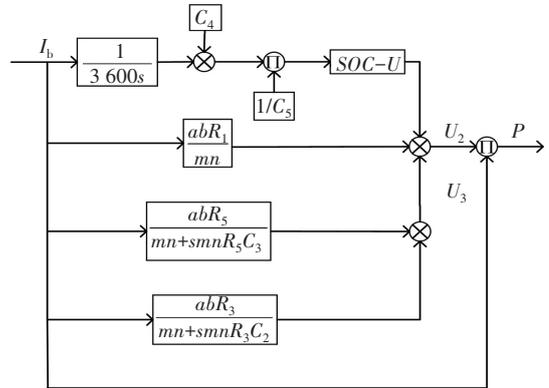


图 6 储能电池调频模型框图

Fig. 6 Block diagram of energy storage battery frequency modulation model

如图 6 所示,其中  $C_4$  为储能电池一开始的容量,  $C_5$  为储能电池的额定容量。除了储能电池的荷电状态与其二端电压密切相关外,电池内部的其他参数也与之密切相关,这些参数会影响其二端电压,进而影响储能电池的具体出力情况。而要想对这些参数进行细致的了解,就要做一个能量存储单元的充电和放电试验,然后进行相应的数学运算,对参数进行拟合,详见文献[16],储能电池的开路电压与其荷电状态的关系以及其他参数与 SOC 的关系公式和锂电池模型的相关参数均在文献[16]有了详尽的描述,在此不再赘述。

综上所述便可以得到辅助电网参与调频的储能电池模型。

#### 3.2 虚拟激励调节器

VSG 的虚拟激励系统主要是模拟同步机的激励系统,也就是模拟同步发电机无功-电压特性,所谓无功电压特性就是指无功功率与电网输出电压的下垂关系,并且体现了励磁电流与无功功率的关系,其公式如下:

$$(U_m - U_r) \times \frac{K_e}{1+sT_e} = \Delta u \quad (4)$$

其中:  $U_m$  为逆变器输出电压的值,  $U_r$  为逆变器输出电压的给定值,  $\Delta u$  为励磁电压的变化量, 且其与强制空载电动势  $E_{qe}$  呈线性关系, 因此

$$E_{qe} = K_f \times u \quad (5)$$

$$K_f = \frac{x_a}{r_f} \quad (6)$$

其中:  $K_f$  为下垂系数,  $x_a$  为直轴绕组电抗,  $r_f$  为绕组电阻。

由式(4)一式(6)可得控制器的框图, 如图 7 所示。图 7 所示的控制框图以逆变器的输出口电压的参考值和其测量值的差值作为该控制器启动调压服务的输入信号, 减少了无功功率偏差量的输入, 实现了直接调压的过程, 抑制了储能电站并网点的暂态电压的波动。

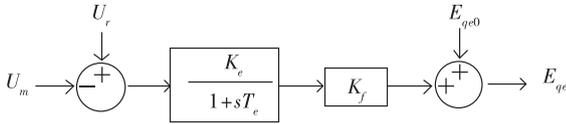


图 7 虚拟励磁控制器框图

Fig. 7 Block diagram of the virtual excitation controller

### 3.3 虚拟速度调节器

VSG 的虚拟调节器主要是对同步发电机的有功-频率特性进行仿真, 从而在调频中实现了对功率的分摊, 使储能设备具备了辅助火电机参与电网调频的能力, 参照式(1), 那么虚拟调速系统模型可以表达为

$$P_{ref} - P_{b0} = K_m (\omega_r - \omega_m) \quad (7)$$

其中:  $P_{ref}$  代替了机械功率, 为储能电池输出功率的给定值,  $P_{b0}$  代替了电磁功率, 为其输出的功率,  $K_m$  为有功-频率的下垂系数,  $\omega_r$  为角频率的参考值,  $\omega_m$  为电网的角频率实时值, 则上述控制框图如图 8 所示。

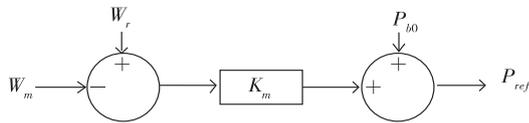


图 8 虚拟调速控制器框图

Fig. 8 Block diagram of the virtual speed control controller

与此同时在上述控制器框图的基础上加入储能电站的调频死区, 并且加入 SOC 的修正曲线, 通过修改调频比例系数, 避免能量储存电池的反复充、放电, 缩短其使用寿命。

### 3.4 基于 VSG 的三阶模型

由式(3)以及 VSG 二阶模型, 再加入暂态调压过程, 进而可以得到基于 VSG 的三阶模型:

$$\begin{cases} 2H \frac{d\Delta\omega}{dt} = P_m - P_e - D\Delta\omega \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_0 \Delta\omega \\ T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{qe} - E'_q - i_d(x_d - x'_d) \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $H$  为虚拟惯量, 代替了同步发电机的惯性时间常数  $T_J$ ,  $D$  为负荷阻尼常数,  $\Delta\omega$  为标称旋转速度与真实旋转速度之差,  $P_m$  为虚拟机械功率, 代替同步发电机的机械转矩,  $P_e$  为虚拟电磁功率, 代替同步发电机的电磁转矩, 而强制空载电动势  $E_{qe}$  代替了同步发电机的定子励磁电动势。

该三阶模型再结合虚拟调速控制器便得到了 VSG 的有功-频率控制框图, 如图 9 所示。

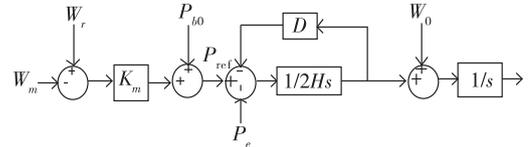


图 9 VSG 功率-频率调节框图

Fig. 9 Block diagram of VSG power-frequency regulation

### 3.5 VSG 的底层控制器

对于 VSG 的底层控制器主要分为两部分, 分别是电压和电流环控制。

#### 3.5.1 电压外回路中加入虚拟阻抗的控制器

为使 VSG 具备与同步发电机相同的电性能, 所以引出了电压外环控制器, 与此同时, 为了有功和无功率环之间的解耦, 方便相关参数的整定, 于是在该控制器处引入一个虚拟阻抗  $L_2$ , 综上所述, 可以得到改进的电压外环控制框图, 如图 10 所示。

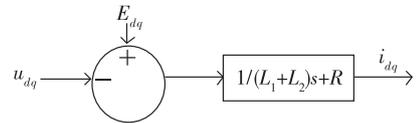


图 10 引入虚拟阻抗的电压外环控制框图

Fig. 10 Block diagram of the voltage outer loop control with introduction of virtual impedance

#### 3.5.2 基于准 PR 控制器的电流内环控制器

本文所要达到的, 不仅仅是精确地跟踪电网的额定频率, 即使出现了一些细微的改变, 也要进行相应的控制。而理想 PR 控制器只能对指定的频率处的传递函数进行放大, 其他频率处的增益效果很低, 所以引出了基于准 PR 控制器的电流内环控制, 它的传递函数如式(9)所示:

$$A_{PR}(s) = k_p + \frac{2k_r\omega_1s}{s^2 + 2\omega_1s + \omega_2^2} \quad (9)$$

其中:  $k_p$  和  $k_r$  为 PI 控制器中的共振系数,  $\omega_1$  为截止频率,  $\omega_2$  为共振频率。针对各种系数的选择, 可以与伯德图相联系来做特定的分析<sup>[10]</sup>, 采用控制变量法, 在保证相关参数不变的情况下, 只让一个参数进行相关的变化, 从而进一步得到随着谐振系数的增大, 系统谐振点的增益明显扩大, 但其带宽不变, 使系统的响应速度加快, 进而可以使得搭建的仿真更加切合实际, 但是谐振系数也不可能无限扩大, 首先就是成本的问题, 其次如果谐振系数过大, 对于电力系统高次谐波的滤除非常困难, 当然, 如果谐振系数过小也不行, 会对电力系统的低次谐波具有一定的放大作用, 因此需要不断的试错, 进一步获得更为合适的值; 而当比例系数增加时, 系统功率的总增益增加, 但系统带宽保持不变, 以及共振点的相位差显著地降低了, 对于功率的准确控制也会产生一定的影响因此也需要不断的试错, 进一步获得更为合适的值, 再结合 LC 滤波器的传递函数便可得到改进的电流内环控制框图, 如图 11 所示。

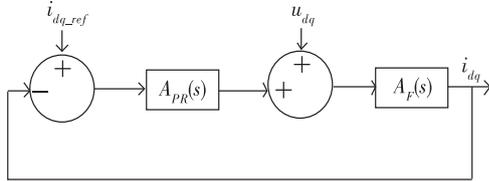


图 11 基于准 PR 控制器的内回路电流控制框图

Fig. 11 Block diagram of inner loop current control base on quasi PR controller

其中

$$A_F(s) = \frac{1}{(L_1s + R)} \quad (10)$$

### 4 实验仿真与分析

为检验上所述控制策略是否正确, 是否有效, 在 PowerFactory 模拟软件中, 建立了一个光伏存储装置, 如图 12 所示电力联运系统, 其中光伏逆变器的面板数设为 2 800 个, 额定视在功率 100 MVA, 有功功率设为 291 kW, 次暂态短路水平 500 kVA, K 系数为 2, 最大电流为 1 p. u., 最小运行电压的开启阈值和关闭阈值分别是 0.1 p. u. 和 0.01 p. u., 开关延迟设置为 1 s。

而对于储能系统并联了 6 个储能单元, 其额定视在功率设置为 10 MVA, 有功功率为 1 MW, 无功功率为

0.03 Mvar, 对于暂态时间常数和次暂态时间常数分别设置为 1.2 s 和 0.03 s, 与光伏发电系统的时间常数一致; 储能系统的最小运行电压的关闭阈值设置为 0, 开启阈值设置为 0.1 p. u., 时间延迟忽略不计, 对于电力系统发生扰动或者故障时, 储能系统可以迅速做出相应的响应, 从而维持电力系统的频率稳定。对于储能系统电流控制器的 d 轴和 q 轴的比例增益以及时间常数默认为 0.1 s 和 0.01 s, 与光伏发电系统的 d 轴和 q 轴的比例增益以及时间常数一致。

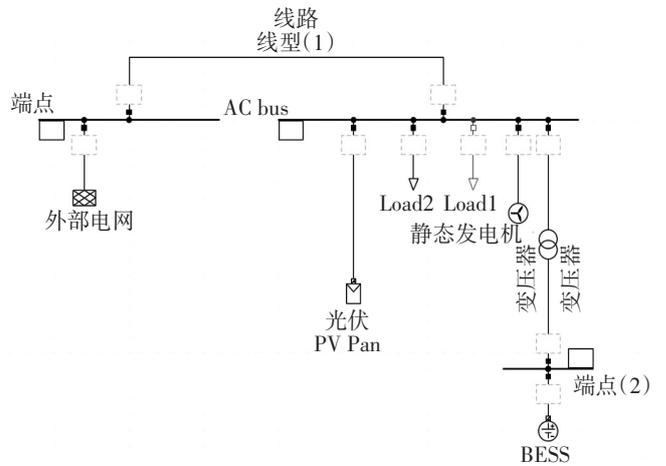


图 12 光伏储能并网供电系统

Fig. 12 Photovoltaic energy storage and grid-connected power supply system

#### 4.1 仿真算例 1

为验证这种改良的主动支撑控制方法的正确性与有效性, 在 IEEE39 节点系统上进行仿真, 提供了主动支撑控制策略实施的背景, 主要是考率新能源的渗透率, 如风电站和光伏电站, 对于风电站中的风机主要以双馈风电机为主, 具体的双馈风电机的控制框架如图 13 所示。

由于采用的仿真软件对于风机的功率封装是固定的, 无法通过实时改变功率来控制风电站的功率输出, 主要是通过改变风速来实时改变功率的输出。

对于光伏电站的一个控制框架具体如图 14 所示。

对于光伏电机的功率控制, 主要考虑了太阳辐射和温度, 二者是光伏电站输出功率的主要因素。在 IEEE39 节点系统中分别在母线 1 和母线 16 处设置了一座风电站和光伏电站, 两座风电站的并联机器数都是设置为 100 台。然后在不考虑发电厂的调频作用, 以及负荷自带的调频作用, 观察所有光伏电站和风电站运行时, 系统的频率变化, 具体如图 15 所示。

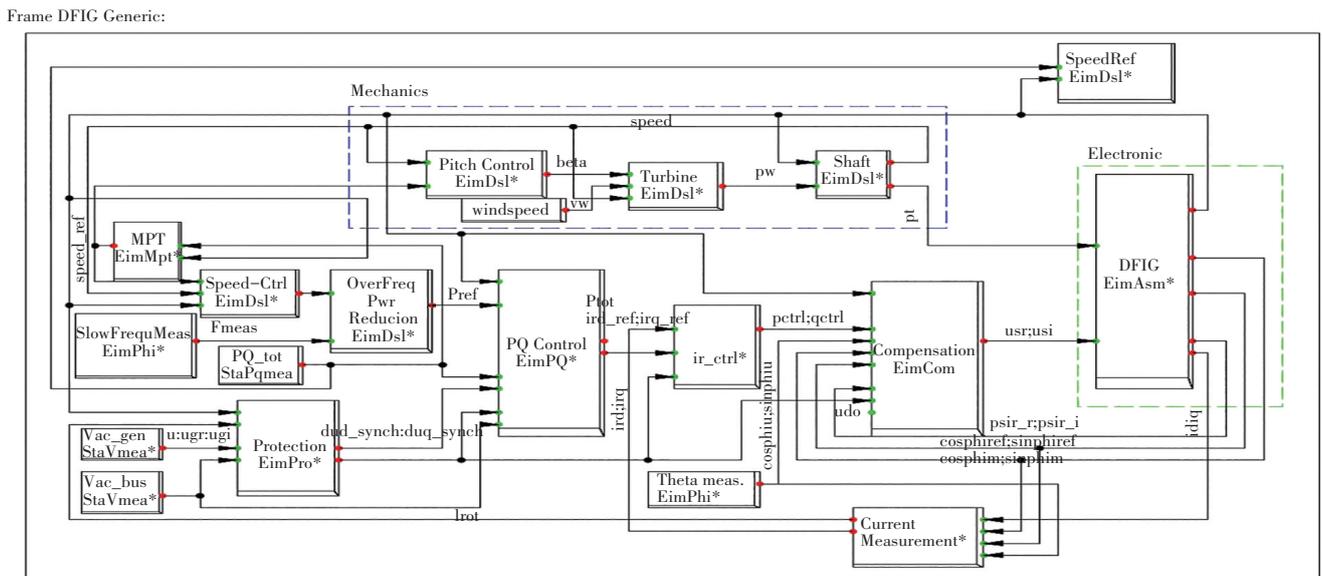


图 13 双馈风电机的控制框架

Fig. 13 Control frame of DFIG-based wind turbine system

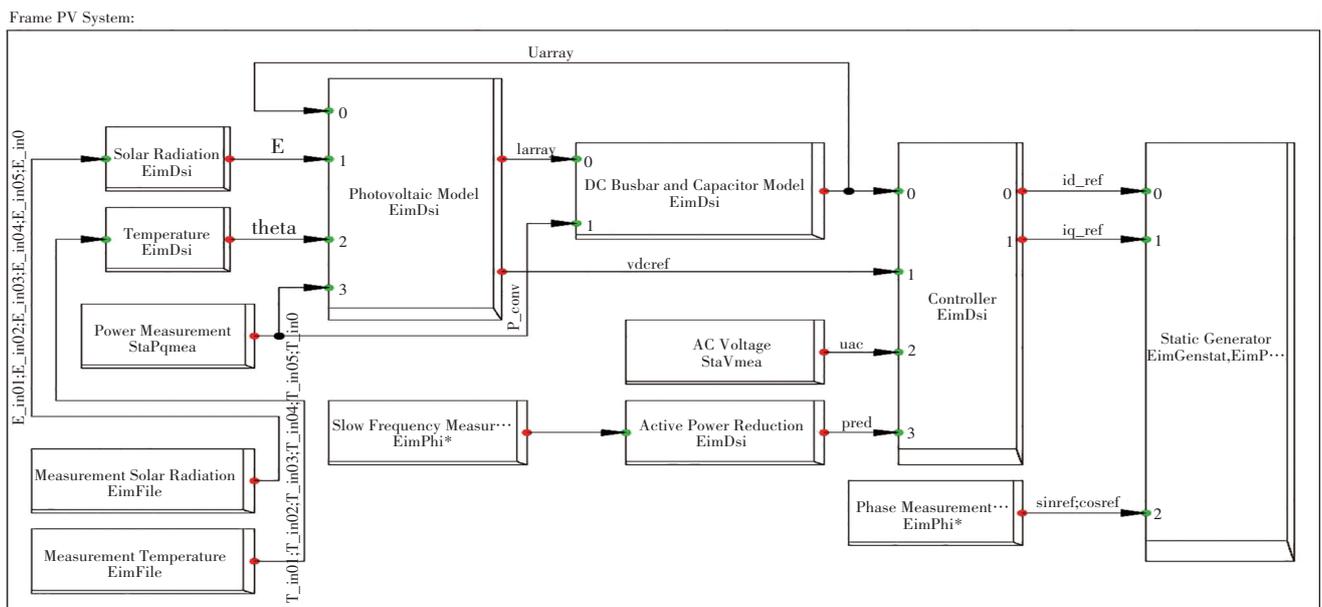


图 14 光伏电机的控制框架

Fig. 14 Control frame of photovoltaic motor

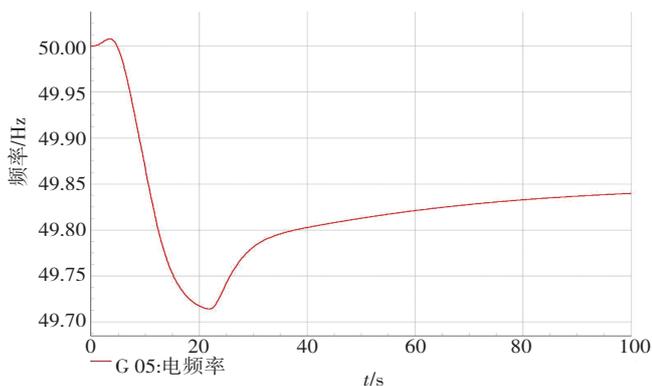


图 15 系统频率的变化

Fig. 15 Changes in system frequency

由图 15 可以看出,在忽略负荷变化时,仅仅是因为风电站和光伏电站的并入,就导致了整个系统的频率变化,可见在新能源高渗透率的情况下,当系统的频率变化的不稳定时,增加电力系统的稳定性是大势所趋,储能电站辅助电网调频势在必行。

在上述的开关事件、负荷扰动事件以及高比例新能源渗透率的情况下,进行仿真,观察储能系统在 5 s 和 10 s 时,储能系统的动作响应,如图 16 所示。图 16 可以看到,储能系统在开关事件和负荷扰动事件发生时,上述控制策略控制储能系统迅速做出响应,充分发挥了储能电池的快速充放电特性,为电力系统的调频

稳压奠定了基础。

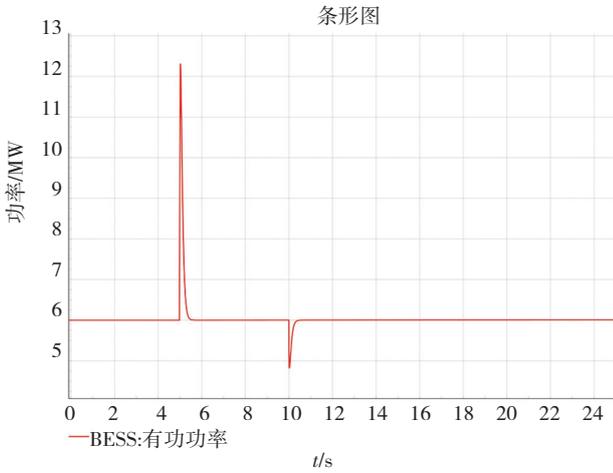


图 16 储能系统的出力

Fig. 16 Output of the energy storage system

### 4.2 仿真算例 2

在上述所建模型和控制策略的基础上,对此进行了改进,主要是对虚拟同步发电机底层控制进行了优化和改进,为了让仿真速度加快,更适用于实际应用场景,所以对上述模型进行了简化,为了验证上述控制策略的正确性、有效性以及优越性,在仿真的 5 s 时,在交流母线处设置了开关事件,事件是 PowerFactory 自带的开关事件,与此同时为检验以上所述控制策略是否正确,是否有效,又在仿真的 10 s 处设置了负荷事件,其有功功率比例阶跃负荷设置为 20%,具体的仿真图形如图 17 所示。

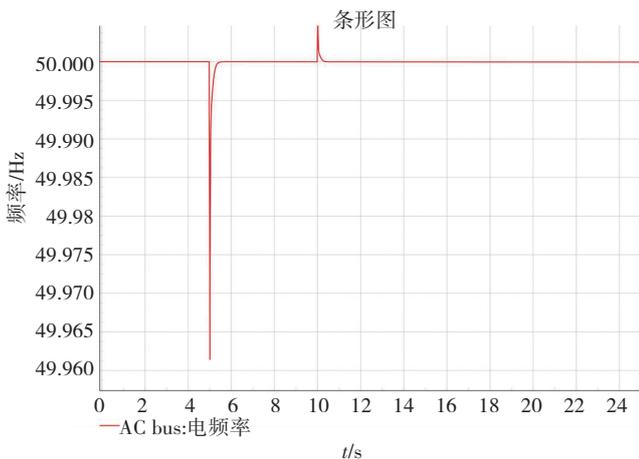


图 17 交流母线处的实测频率

Fig. 17 Measured frequency at the AC bus

由图 17 可得,对 VSG 底层控制的优化和改进,不仅使得储能系统在开关事项和负荷扰动事件发生时,更加迅速地做出响应,而且保证了系统频率偏差在 0.2 Hz 以内,保证了系统频率的稳定性,证明了该优化控制

策略的有效性。

## 5 结论

针对高比例新能源发电,如光伏、风电的并网,进而导致的一系列调频问题,提出了基于 VSG 三阶模型的改进的主动支撑控制策略,结论如下:

(1) 对同步发电机的基本原理进行了详尽的介绍,与此同时,将其与 VSG 控制策略进行比较,在此基础上说明了 VSG 的技术的可行性和必要性。

(2) 在“双碳”目标提出的背景下,随着新能源渗透率的持续增加,电网的频率调节压力也在增加,并且因为低惯性的特性,导致电力系统的稳定性,也越来越差,从而引出了储能系统的加入势在必行。

(3) 基于 VSG 三阶模型的改进的主动支撑控制策略的提出,并对其模型进行了搭建,充分证明了策略对储能系统的控制作用,充分发挥了储能系统的快速充放电性,改善了电力系统的频率质量,提高了储能电站并网的调频稳压能力。

(4) 通过在 IEEE39 节点中根据各个省市的电网情况,如风电站的分布,光伏电站的分布,以及发电厂的分布,在该系统上进行严格的模拟,进一步可以得到高比例新能源渗透率的情况下,风电站和光伏电站在并网时,对整个电力系统的频率的实时的影响,以及对于储能电站的分布和储能电池的容量配置都具有一定的参考意义。

### 参考文献(References):

[1] 史立山. 构建适应可再生能源资源特点的新型电力体系[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(4): 1—4.  
SHI Li-shan. Building a new power system adapted to the characteristics of renewable energy resources[J]. Power Grid and Clean Energy, 2009 25 (4): 1—4.

[2] 闫晓霞, 张金锁, 邹绍辉. 我国可耗竭能源资源最优开采模型研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(9): 81—90.  
YAN Xiao-xia, ZHANG Jin-suo, ZOU Shao-hui. Research on the optimal exploitation model of depletable energy resources in China[J]. Management Science in China, 2016, 24 (9): 81—90.

[3] 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.  
LV Zhi-peng, SHENG Wan-xing, ZHONG Qing-chang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (16): 2591—

- 2603.
- [4] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165—175.  
ZHENG Tian-wen, CHEN Lai-jun, CHEN Tian-yi, et al. Virtual synchronous generator technology and prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165—175.
- [5] 张明霞, 闫涛, 来小康, 等. 电网新功能形态下储能技术的发展愿景和技术路径[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1370—1377.  
ZHANG Ming-xia, YAN Tao, LAI Xiao-kang, et al. Technology vision and route of energy storage under new power grid function configuration [J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1370—1377.
- [6] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3315—3325.  
LI Xiang-jun, WANG Shang-xing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for Battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3315—3325.
- [7] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 82—89.  
CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 82—89.
- [8] 胡安平, 杨波, 潘鹏鹏, 等. 基于电力电子接口的储能系统惯性特征研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 4999—5008.  
HU An-ping, YANG Bo, PAN Peng-peng, et al. Study on inertial characteristics of energy storage system with power electronic interface [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4999—5008.
- [9] 刘闯, 孙同, 蔡国伟, 等. 基于同步机三阶模型的电池储能电站主动支撑控制及其一次调频贡献力分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4854—4866.  
LIU Chuang, SUN Tong, CAI Guo-wei, et al. Analysis of active support control and primary frequency modulation contribution of battery energy storage power station based on the third-order model of synchronous machine [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2020, 40(15): 4854—4866.
- [10] 严凌霄. 储能系统参与电网辅助调频的优化控制策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.  
YAN Ling-xiao. Energy storage system participates in the optimization control strategy of power grid auxiliary frequency modulation [D]. Nanjing: Southeastern University, 2021.
- [11] 张兴宇. 基于虚拟同步发电机并网逆变器控制策略研究[D]. 成都: 西华大学, 2022.  
ZHANG Xing-yu. Research on the control strategy of grid-connected inverter based on virtual synchronous generator [D]. Chengdu: Xihua University, 2022.
- [12] 葛平娟, 涂春鸣, 肖凡, 等. 面向暂态稳定性能提升的VSG参数灵活控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2109—2124.  
GE Ping-juan, TU Chun-ming, XIAO Fan, et al. Flexible control strategy for VSG parameters for transient stability improvement [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2022, 42(6): 2109—2124.
- [13] 程天琪. 基于虚拟同步发电机的微网逆变器控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.  
CHENG Tian-qi. Research on microgrid inverter control based on virtual synchronous generator [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [14] 崔小白. 基于虚拟同步机控制的微网逆变器关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.  
CUI Xiao-bai. Research on the key technology of micro-grid inverter based on virtual synchronous machine control [D]. Nanjing: Southeastern University, 2017.
- [15] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.  
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Theory and analysis of dynamic power systems [M]. Beijing:
- [16] 黄亚唯. 储能电源参与电力系统调频的需求场景及其控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.  
HUANG Ya-wei. Research on demand scenario and control strategy of energy storage power supply participating in power system frequency regulation [D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [17] 张鹏鸣, 顾军, 张强. 弱电网下模型预测并网逆变器控制策略[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2019, 36(6): 100—105.  
ZHANG Peng-ming, GU Jun, ZHANG Qiang. Control strategy of grid-connected inverter predicted by model under weak grid [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2019, 36(6): 100—105.