

高风电渗透率下考虑电网频率支撑需求的 储能系统配置方法

刘洪波¹, 张 崇¹, 孙 同², 彭晓宇¹, 张书钰¹

(1. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室, 吉林 吉林 132012;

2. 国网吉林省电力公司, 吉林 长春 130000)

摘要:提出了一种高风电渗透率下考虑电网频率支撑需求的储能系统配置方法。以频率变化率和频率偏差为限制条件,建立新能源系统所能承受的最大功率增量与等效惯性常数、调差系数以及风电渗透率等已知参数的联系。通过对3阶虚拟同步机控制策略下的储能系统容量与控制参数进行量化配置,提高不同风电渗透率系统对不平衡功率的消纳能力。以储能配置在频率支撑中贡献的等效单位调节功率为参考,对不同功率增量下储能系统的频率响应贡献、调频出力占比以及输出功率特性进行刻画与分析。仿真验证了该配置方法下的储能系统可控性强,能够较为精准地提供电网所需的有功调节量,有效改善风电并网环境。

关键词:高风电渗透率;频率支撑需求;最大功率增量;储能配置;单位功率调节

中图分类号:TM 761⁺.2;TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202110014

0 引言

为缓解温室效应,降低碳排放量,以风电为代表的新能源机组正在逐步取代传统的火电机组。因此,在规模日益扩大的电力系统中,由负荷投切及风电机组出力的波动性、不确定性^[1]等因素导致的功率波动变得愈加频繁和剧烈。与此同时,电力电子器件将风电机组旋转设备与电网频率解耦,扩大了系统惯量与调频容量的缺额^[2],电网的稳定运行面临着极大挑战。

通常,风电场的发电环节在最大功率下进行最大功率点跟踪(MPPT)控制。为提高风电机组的频率支撑能力,文献[3-4]通过改善系统的下垂特性制定了适应于不同风速的变系数控制方法,文献[5-6]通过减载与桨距角控制保留了部分有功备用。考虑到上述减少风电机组发电量的方式造成的弃风浪费,文献[7-8]结合双馈风机网侧变流器的控制特性提出了基于超级电容与风电机组的协调控制,在增强风电机组抗扰性的同时有效提高了风电利用率。然而,安装于风电场源端的储能设备投入容量小,区域配置分散,平抑网侧负荷波动的能力大幅受限。

近年来,随着规模化储能技术的成熟,储能系统(ESS)凭借爬坡速率快、运行范围广、启停灵活等特点在电网的调频和规划中受到了广泛关注^[9]。为改善ESS变流器的并网外特性,大量研究围绕基于同步机转子运动方程及电气方程的虚拟同步发电机(VSG)控制展开^[10-13]。其中,文献[10]通过分析ESS

调频的动态特性提出了跟随荷电状态(SOC)及频率偏差调整出力的自适应控制策略,兼顾了ESS的调频效果与荷电保持率。文献[11]在保留传统VSG控制中惯性和阻尼参数的基础上引入了基于频率偏差的积分控制,通过受端换流器的协调配合实现了频率的无差调控。文献[12-13]通过模拟同步发电机的暂态调压过程提出了基于同步机3阶模型的VSG控制策略,进一步增强了ESS的支撑能力。但相关研究主要着力于控制策略的改进及其稳定性分析,有关ESS配置的依据以及系统层面上的讨论并不充分。

考虑到系统以频率变化率(ROCOF)和稳态频率偏差(SSFD)为代表的频率响应需求,文献[14-18]提出了通过配置ESS为系统提供惯量与一次调频支撑的可行性方案。其中,文献[15-16]以ESS并网逆变器中的控制参数为变量对ESS参与电网调频的支撑能力与贡献力进行了比较与分析。文献[17]通过仿真刻画了ESS提供的虚拟惯性关于其配置容量的关系曲线。文献[18]分别基于惯性常数和下垂系数的目标值对ESS在不同频率支撑阶段所需配置的容量进行了估算。但以上研究并未在理论上建立ESS容量与控制参数的联系,难以保证配置结果的最优,降低了ESS调频的可控性与自适应能力。

综上,为补充当前ESS配置过程缺失的理论支撑,提高ESS调频的可控性,本文在并网逆变器采用3阶VSG控制策略下的ESS中提出了满足电网频率支撑需求的容量及惯量配置方法,明确了ESS投入的必要条件,定义了ESS对系统频率响应贡献的调节量,讨论了ESS容量对该调节量的影响,刻画了ESS的频率响应贡献、调频出力占比关于系统功率增量的关系曲线,深入分析了ESS调频的动态过程

收稿日期:2021-02-08;修回日期:2021-08-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902000)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0902000)

及调节性能。最后通过 DiGSILENT / PowerFactory 中搭建的不同风电渗透率系统的仿真模型,验证了所提 ESS 配置方法及相关理论分析的准确性。

1 最大功率增量与临界风电渗透率

1.1 频率响应限制下的最大功率增量

用 H 表示同步机的惯性常数,表征转子机械惯性的。对于包含 n 个同步机单元的电力系统,其等效惯性常数 H_{sys} 为:

$$H_{\text{sys}} = \left(\sum_{i=1}^n H_i S_i \right) / S_{\text{sys}} \quad (1)$$

式中: H_i 和 S_i 分别为第 i 个同步机单元的惯性常数和额定容量; S_{sys} 为系统的总装机容量。当系统中由负荷增量与电源出力增量的差值产生功率增量 ΔP_{sys} 时,不计风电机组及负荷的调节作用, $\Delta P_{\text{sys}} \sim H_{\text{sys}}$ 以及初始 ROCOF 的关系可由式(2)所示运动方程描述。

$$\frac{2H_{\text{sys}}}{f_0} \frac{df}{dt} = -\frac{P_e - P_l}{S_{\text{sys}}} = -\frac{\Delta P_{\text{sys}}}{S_{\text{sys}}} \quad (2)$$

式中: f_0 为系统的初始频率; P_e 和 P_l 分别为系统等值同步机的电磁功率与机械功率; f 为系统频率; t 为时间。将式(1)代入式(2),得到 ΔP_{sys} 的表达式为:

$$\Delta P_{\text{sys}} = -\frac{2 \sum_{i=1}^n H_i S_i}{f_0} \frac{df}{dt} \quad (3)$$

当 df/dt 的取值已知时,由式(3)可得系统在该 ROCOF 要求下能承受的最大功率增量 ΔP_{sysh} 。进一步,将系统中风电机组装机容量与系统总容量的比值定义为风电渗透率 ξ ,若不计 H_i 的差异,则 ΔP_{sysh} 可表示为:

$$\Delta P_{\text{sysh}} = 2H_i \frac{S_{\text{sys}} (\xi - 1)}{f_0} \frac{df}{dt} \quad (4)$$

用 K 表示同步机的单位调节功率,描述同步机的有功-频率下垂特性。对于包含 n 个同步机单元的电力系统,其等效单位调节功率 K_{sys} 为:

$$K_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{f_0} \frac{S_i}{\sigma_i} \quad (5)$$

式中: σ_i 为第 i 个同步机单元的调差系数。若仅考虑一次调频且认为同步机的调频容量充足,则 ΔP_{sys} 、 K_{sys} 以及 SSFD 值 Δf 的关系如式(6)所示。

$$K_{\text{sys}} = -\Delta P_{\text{sys}} / \Delta f \quad (6)$$

将式(5)代入式(6),得到 K_{sys} 的表达式为:

$$\Delta P_{\text{sys}} = -\sum_{i=1}^n K_i \Delta f = -\Delta f \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} \frac{S_i}{f_0} \right) \quad (7)$$

式中: K_i 为第 i 个同步机单元的单位调节功率。当 Δf 的取值已知时,由式(7)可求得系统在该 SSFD 要求下能够承受的最大功率增量 ΔP_{sysk} ,若不计 σ_i 的差异, ΔP_{sysk} 可以表示为:

$$\Delta P_{\text{sysk}} = \frac{S_{\text{sys}} (\xi - 1)}{\sigma_i f_0} \Delta f \quad (8)$$

综上, ΔP_{sysh} 与 ΔP_{sysk} 中的较小值即为系统同时满足 ROCOF 和 SSFD 要求时所能承受的最大功率增量 ΔP_{sysh} 。由式(4)和式(8)可见,随着风电渗透率的提高,系统消纳冗余功率的能力不断下降。

1.2 频率响应限制下的临界风电渗透率

同理,若系统中由负荷增量和风电机组出力等因素导致的最大功率增量 ΔP_{sysm} 已知,则以频率响应为限制条件可求得系统中风电渗透率的临界值。

由式(4)求得系统在 ROCOF 限制下的风电渗透率临界值 ξ_h 为:

$$\xi_h = 1 + f_0 \Delta P_{\text{sysm}} / [2H_i S_{\text{sys}} (df/dt)] \quad (9)$$

由式(8)求得系统在 SSFD 限制下的风电渗透率临界值 ξ_k 为:

$$\xi_k = 1 + \sigma_i f_0 \Delta P_{\text{sysm}} / (S_{\text{sys}} \Delta f) \quad (10)$$

ξ_h 与 ξ_k 中的较小值即为同时考虑 ROCOF 和 SSFD 限制时系统中风电渗透率的临界值 ξ_b 。

通常,系统中的不平衡功率由负荷及调频机组共同承担。但基于 MPPT 或下垂控制的风电机组通过预留有功备用的方式保留调频容量,产生弃风浪费的同时其调节过程可能造成频率的二次下降^[3],而负荷的频率支撑功能会在一定程度上削减用户侧需求。因此,下文将在不改变风电机组出力和负荷功率的条件下配置 ESS 作为能量缓冲器,补充系统在不同调频阶段所需的功率支撑。

2 ESS 配置方法及其支撑能力分析

2.1 ESS 的控制结构

本文的 ESS 配置主要针对系统在有功波动下的 ROCOF 与 SSFD 需求,但潮流的改变亦会对电流和电压产生一定影响,因此,ESS 的网侧逆变器采用了如附录 A 图 A1 所示的 3 阶 VSG 控制结构。通过模拟同步机的标准并网外特性,ESS 的励磁和调速系统时间尺度能够与系统传统机组的调节过程相吻合。同步机的电磁功率表达式如式(11)所示。

$$P_e = \frac{E'_q U}{x'_d + x_e} \sin \delta + \frac{(x'_d + x_e - x_q) U^2}{2(x'_d + x_e) x_q} \sin(2\delta) \quad (11)$$

式中: E'_q 为暂态电动势; x'_d 为直轴瞬变电抗; x_q 为交轴同步电抗; x_e 为线路及变压器电抗; U 为网侧电压; δ 为功角。ESS 通过调速器与励磁器的设计能够实现 δ 与 E'_q 的自动调节,补充系统缺失的调频容量。模拟同步机的二阶转子运动方程为:

$$\begin{cases} 2H d\omega/dt = P_l - P_e - D\Delta\omega \\ d\delta/dt = \omega_0 \Delta\omega \end{cases} \quad (12)$$

式中: D 为阻尼系数; ω 、 ω_0 分别为发电机角速度及其初始值; $\Delta\omega$ 为 ω 偏差。通过模拟同步机的静态频率

特性, ESS在系统调频中实现与同步机间不平衡功率的自动分摊, 即:

$$\Delta P_{\text{ESS}} = K(f_{\text{ref}} - f_{\text{mea}}) \quad (13)$$

式中: f_{ref} 、 f_{mea} 分别为系统频率参考值、实测值; ΔP_{ESS} 为ESS输出功率的参考值; K 为同步发电机单位调节功率。 ΔP_{ESS} 与ESS实际发出的功率 P_{mea} 分别对应于同步发电机的机械功率与电磁功率。

在此基础上, ESS通过模拟同步发电机的一阶暂态电压方程引入暂态调压过程, 即通过引入直轴电流分量 i_d 建立起调压控制器和调速控制器的耦合调节关系, 如式(14)所示。

$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{qe} - E'_q - i_d(x_d - x'_d) \quad (14)$$

式中: T'_{d0} 为励磁绕组的时间常数; E_{qe} 为强制空载电动势; x_d 为直轴同步电抗。将同步发电机的自动调节励磁系统等值为一阶惯性环节, 以电压偏差量作为调压控制器的启动信号, 如式(15)所示。

$$(U_{\text{mea}} - U_{\text{ref}}) \frac{K_e}{1 + sT_e} = \Delta U_f \quad (15)$$

式中: U_{mea} 为逆变器出口电压实测值; U_{ref} 为逆变器出口电压参考值; ΔU_f 为励磁电压偏差量; K_e 和 T_e 分别为等值的放大倍数和时间常数。其中, 励磁电压 U_f 和强制空载电动势之间的关系如式(16)所示。

$$E_{qe} = \frac{x_{ad}}{r_f} U_f = K_f U_f \quad (16)$$

式中: x_{ad} 为直轴电枢反应绕组电抗; r_f 为励磁绕组电阻; K_f 为励磁比例系数。由此得到端电压偏差 ΔU_b 与空载电动势偏差 ΔE_{qe} 的关系为:

$$-\Delta U_b \frac{K_e}{1 + sT_e} = \frac{1}{K_f} \Delta E_{qe} \quad (17)$$

综上可得ESS网侧逆变器的3阶VSG控制结构。为与同步机进行区分, ESS的虚拟惯性常数和虚拟单位调节功率分别用 H_v 与 K_v 表示, 其中 H_v 决定了惯性响应阶段ESS功率输出的时长与提供惯量支撑的能力, K_v 决定了在ESS调节能力允许范围内满足电网一次调频需求的调频深度。此外, ESS的调节特性还受到阻尼系数、SOC、源端特性等因素的影响, 文献[13]已经对此做出了讨论, 本文不再赘述。

2.2 ESS的频率响应贡献

产生功率增量时, 由式(3)可得系统投入ESS后的初始ROCOF为:

$$\frac{df}{dt} = \frac{-\Delta P_{\text{sys}} f_0}{2(H_{\text{sys0}} S_{\text{sys0}} + H_{\text{ESS}} S_{\text{ESS}})} \quad (18)$$

式中: S_{sys0} 、 H_{sys0} 和 S_{ESS} 、 H_{ESS} 分别为系统本身和ESS配置的容量、等效惯性常数。将系统投入ESS前后ROCOF的差值定义为ESS对初始ROCOF贡献的调节量 μ_h , 如式(19)所示。

$$\mu_h = \frac{\Delta P_{\text{sys}} f_0 H_{\text{ESS}} S_{\text{ESS}}}{2H_{\text{sys0}} S_{\text{sys0}} (H_{\text{sys0}} S_{\text{sys0}} + H_{\text{ESS}} S_{\text{ESS}})} \quad (19)$$

同理, 将系统投入ESS前后SSFD的差值定义为ESS对SSFD贡献的调节量 μ_k , 如式(20)所示。

$$\mu_k = \frac{\Delta P_{\text{sys}} K_{\text{ESS}}}{K_{\text{sys0}} (K_{\text{sys0}} + K_{\text{ESS}})} \quad (20)$$

式中: K_{sys0} 为系统本身的等效单位调节功率; K_{ESS} 为ESS的等效单位调节功率。

由于该ESS配置方法中的 K_{ESS} 通常与 S_{ESS} 成正比(这一点将在2.4节中说明), 故可求取 μ_h 和 μ_k 关于 S_{ESS} 的高阶导数, 由此可知在控制参数一定时, ESS对电网频率的调节速率随 S_{ESS} 的提高而降低。考虑到调频的经济性, 一种合理的ESS配置方法是十分必要的。

2.3 ESS的配置方法

考虑到不同时间尺度与不同功率波动下的调频需求, S_{ESS} 通常需要在系统产生最大功率增量 ΔP_{sysm} 的情况下进行配置。由于惯性响应的的时间尺度很小, S_{ESS} 可先按照SSFD的要求进行确定, 此后对控制中关乎惯性的其他参数进行配置, 使得 S_{ESS} 能够同时满足ROCOF的需求。

2.3.1 ESS的容量配置

本文中的ESS容量配置主要包括功率容量 P_{ESS} (最大输出与输入功率) 以及能量容量 E_{ESS} , 前者决定了ESS频率支撑能力的极限, 后者关乎ESS能量充放的时长。

以负荷突增为例, 当系统产生最大功率增量时, SSFD限制下需要ESS补充的最小功率容量为:

$$P_{\text{ESS}} = \Delta P_{\text{sysm}} - \Delta P_{\text{sysk}} \quad (21)$$

考虑系统中功率波动的双向性与ESS的充/放电效率 η , ESS配置的最大输出功率 P_{ESSout} 和最大输入功率 P_{ESSin} 分别调整为:

$$\begin{cases} P_{\text{ESSout}} = (\Delta P_{\text{sysm}} - \Delta P_{\text{sysk}}) \eta^{-1} \\ P_{\text{ESSin}} = (\Delta P_{\text{sysm}} - \Delta P_{\text{sysk}}) \eta \end{cases} \quad (22)$$

通常, ESS在一次调频阶段需要提供至少15 min的功率支撑^[18]。因此, 当配置 E_{ESS} 时, 可以忽略惯性响应过程。在此条件下, 由式(22)可求取ESS的放电能量 E_{ESSout} 、充电能量 E_{ESSin} 分别为:

$$\begin{cases} E_{\text{ESSout}} = \int_0^{0.25} P_{\text{ESSout}} dt \\ E_{\text{ESSin}} = \int_0^{0.25} P_{\text{ESSin}} dt \end{cases} \quad (23)$$

E_{ESSout} 与 E_{ESSin} 之和即为所提方法下ESS所需配置的 E_{ESS} ; E_{ESSout} 与 E_{ESS} 的比值为ESS的初始SOC。

2.3.2 ESS的惯量配置

在ESS中, 影响系统SSFD与ROCOF的参数主要为等效单位调节功率 K_{ESS} 和等效惯性常数 H_{ESS} 。由ESS的控制框图可知, 在其满发前, K_{ESS} 和 H_{ESS} 分别由并网逆变器控制中的 K_v 与 H_v 决定, 因此, 下文将在不计传输功率损耗的情况下对 K_v 与 H_v 的大小

进行配置。

ESS 容量的确定过程表明,所提的 ESS 配置方法至少能够保证在系统功率增量不大于 ΔP_{sys} 的范围内提供可靠的一次调频支撑,且当 Δf 达到系统所允许的极限值时 ESS 恰好满发,此时 P_{ESS} 与 Δf 的比值即为 ESS 配置的 K_v 。

接下来配置 ESS 的虚拟惯性常数 H_v 。由于本文的 ESS 配置主要考虑有功支撑,结合电化学 ESS 储能变流器技术规范^[19]的相关要求,可认为 ESS 的视在功率 S_{ESS} 的大小与 P_{ESS} 近似相同。因此,由式(18)可得在系统 ROCOF 要求下,ESS 需要具备的等效惯性常数 H_{set} 为:

$$H_{\text{set}} = \frac{-f_0 \Delta P_{\text{sys}}}{2S_{\text{ESS}}(df/dt)} - \frac{H_{\text{sys0}} S_{\text{sys0}}}{S_{\text{ESS}}} \quad (24)$$

然而,由于 P_{ESS} 的限制, H_{set} 的取值过大会加快 ESS 在惯量支撑阶段输出功率的饱和,无法保证系统在最大功率增量下的 ROCOF 需求,故有必要对 P_{ESS} 的选取做进一步讨论。

假设 ESS 的响应足够迅速,能够瞬间提供其最大支撑功率,则系统在 ROCOF 要求下可承受的最大功率增量将由 ΔP_{sysh} 变为 ΔP_{sysh} 与 P_{ESS} 之和,由式(18)可得此时 ESS 的等效惯性 H_{ful} 为:

$$H_{\text{ful}} = \frac{-f_0 (P_{\text{ESS}} + \Delta P_{\text{sysh}})}{2S_{\text{ESS}}(df/dt)} - \frac{H_{\text{sys0}} S_{\text{sys0}}}{S_{\text{ESS}}} \quad (25)$$

在 H_{ful} 的设定下,ESS 恰好在 ROCOF 达到系统允许的极限值时满发。因此,在 $H_{\text{set}} \leq H_{\text{ful}}$ 的情况下,ESS 能够在功率增量小于等于 ΔP_{sys} 的情况下提供系统所需的惯量支撑;若 $H_{\text{set}} > H_{\text{ful}}$,则 ESS 会由于自身容量的限制而无法保证在惯性响应阶段承担足够的功率,ESS 的容量将按照 ROCOF 的需求进行调整。综上,所提 ESS 配置方法的总体流程见图 1。

2.4 ESS 的支撑能力分析

工程应用中,ESS 配置过程所选取的 ΔP_{sys} 可能不等于系统未来产生的最大功率增量。为深入探讨 ESS 在不同 ΔP_{sys} 下的频率支撑能力,下文仍以负荷突增为例,基于 ESS 提供的等效单位调节功率 K_{ESS} 对其频率响应贡献与调频出力占比进行分析。

2.4.1 ESS 的频率响应贡献

由前文分析可知,当 $\Delta P_{\text{sys}} \leq \Delta P_{\text{sysd}}$ 时,ESS 提供的支撑功率为 K_v 与 Δf 的乘积, K_{ESS} 恒定; $\Delta P_{\text{sys}} > \Delta P_{\text{sysd}}$ 时,ESS 由于容量的限制仅提供其配置功率 P_{ESS} ,此时 K_{ESS} 为 P_{ESS} 与 Δf 的比值,随 ΔP_{sys} 的增大而减小。

由此得到系统配置 ESS 前后 Δf 关于 ΔP_{sys} 的关系曲线如图 2 所示。图中, ΔP_{sysd} 为 ESS 调频死区对应的功率增量,2 条特性曲线的差值为 ESS 对 SSFD 贡献的调节量 μ_k 。由图可知,当 ΔP_{sys} 在 ΔP_{sysd} 与 ΔP_{sysm} 之间时, μ_k 的大小与 ΔP_{sys} 成正比;当 $\Delta P_{\text{sys}} > \Delta P_{\text{sysm}}$

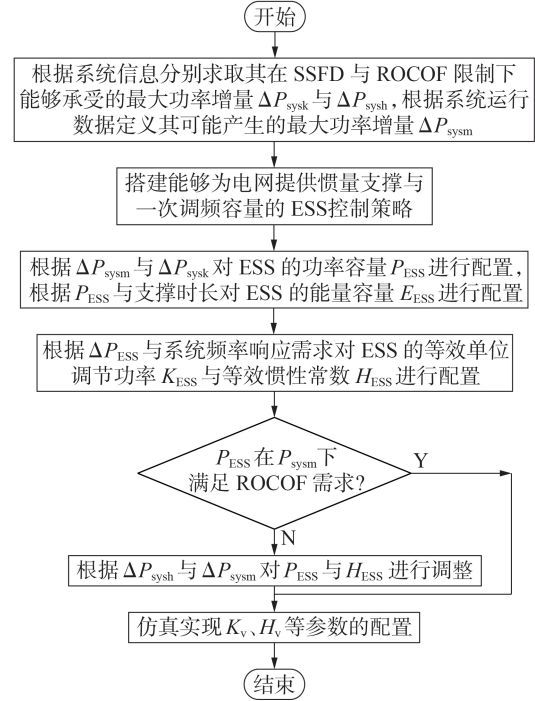


图 1 ESS 配置方法的流程图

Fig.1 Flowchart of ESS configuration method

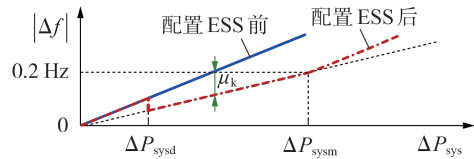


图 2 Δf 与 ΔP_{sys} 的关系曲线

Fig.2 Relationship curves of Δf vs. ΔP_{sys}

时, μ_k 不再随 ΔP_{sys} 的增大而改变。因此,ESS 对系统频率贡献的最大调节量 μ_{kmax} 是固定的。

根据 K_{ESS} 与 ΔP_{sys} 的关系并结合式(20)中 μ_k 的表达式,可得 μ_{kmax} 为:

$$\mu_{\text{kmax}} = P_{\text{ESS}} / K_{\text{sys0}} \quad (26)$$

由式(26)可见,系统本身的单位调节功率 K_{sys0} 越小,ESS 的频率调节效果越显著。综上,得到 μ_k 与 ΔP_{sys} 的关系如图 3 所示。图中, $K_{\text{sys0I}} < K_{\text{sys0II}}$ 。

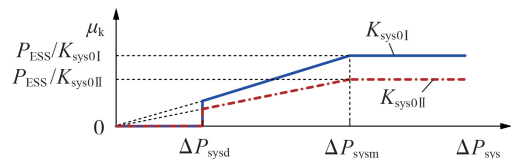


图 3 μ_k 与 ΔP_{sys} 的关系曲线

Fig.3 Relationship curves of μ_k vs. ΔP_{sys}

2.4.2 ESS 的调频出力占比

ESS 和系统中的同步机按照单位调节功率的大小实现不平衡功率的自动分摊。其中,当 ΔP_{sys} 在 ΔP_{sysd} 与 ΔP_{sysm} 之间时,ESS 的一次调频出力占比 p_k 为固定值,且 ESS 在系统功率增量为 ΔP_{sysm} 时恰好

满发,因此, p_k 为 P_{ESS} 与 ΔP_{sys} 的比值;当 $\Delta P_{\text{sys}} > \Delta P_{\text{sysm}}$ 时,ESS 提供的功率支撑恒定,由此得到 p_k 关于 ΔP_{sys} 的表达式如式(27)所示。

$$p_k = \begin{cases} P_{\text{ESS}} / \Delta P_{\text{sysm}} & \Delta P_{\text{sysd}} \leq \Delta P_{\text{sys}} \leq \Delta P_{\text{sysm}} \\ P_{\text{ESS}} / \Delta P_{\text{sys}} & \Delta P_{\text{sys}} > \Delta P_{\text{sysm}} \end{cases} \quad (27)$$

由于本文中 ESS 配置的 P_{ESS} 由 ΔP_{sysm} 与 ΔP_{sysk} 决定,将式(21)代入式(27)可得:

$$p_k = \begin{cases} 1 - \Delta P_{\text{sysk}} / \Delta P_{\text{sysm}} & \Delta P_{\text{sysd}} \leq \Delta P_{\text{sys}} \leq \Delta P_{\text{sysm}} \\ (\Delta P_{\text{sysm}} - \Delta P_{\text{sysk}}) / \Delta P_{\text{sys}} & \Delta P_{\text{sys}} > \Delta P_{\text{sysm}} \end{cases} \quad (28)$$

由式(28)可知,除 ΔP_{sys} 之外, p_k 主要取决于 ESS 配置方案中 ΔP_{sysm} 的选取。 ΔP_{sysm} 的取值越大,ESS 配置的容量越大,相同 ΔP_{sys} 下 ESS 的出力占比越大。 p_k 关于 ΔP_{sys} 与 ΔP_{sysm} 的关系如图 4 所示。图中, $\Delta P_{\text{sysmI}} < \Delta P_{\text{sysmII}} < \Delta P_{\text{sys}}$

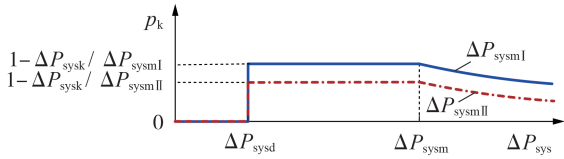


图 4 p_k 与 ΔP_{sys} 的关系曲线

Fig.4 Relationship curves of p_k vs. ΔP_{sys}

3 算例分析

为了验证系统中风电渗透率与最大功率增量的关系,讨论 ESS 配置方法的合理性,分析 ESS 参与电网频率调控的动态过程及其调频性能,本文采用 DigSILENT / PowerFactory 仿真软件搭建附录 A 图 A2 所示的 12 节点多区域算例系统。该系统总装机容量 $S_{\text{sys}} = 2248 \text{ MV} \cdot \text{A}$,总有功负荷 $P_{\text{sys}} = 1450 \text{ MW}$,通过控制风电场 $W_1 - W_4$ 和传统电厂 $G_1 - G_4$ 相关机组的启停对风电渗透率 ξ 进行改变。为了便于仿真与理论结果的对比并保证变量的唯一性,系统中同步机的惯性常数为 5 s,调差系数为 0.04。根据我国电力系统稳定安全运行的规范和要求,ROCOF 和 SSFD 的限值分别取 0.5 Hz/s 与 0.2 Hz,最大功率增量 ΔP_{sysm} 定义为系统中所有有功负荷突增 10%。

3.1 仿真算例 1

为了验证系统中风电渗透率与最大功率增量的关系,算例 1 根据式(4)和式(8)对 ξ 分别为 30%、40%、50%、60% 和 70% 的系统所能承受的最大功率增量 ΔP_{sysb} 进行求取,并在仿真中设置不同风电渗透率的系统在 200 s 时分别产生其对应的 ΔP_{sysb} ,得到频率响应波形见附录 B 图 B1,相关数据见表 1 (表中变量下标“SI”表示所求对象的仿真值,后同)。由表中数据可知,不同风电渗透率的系统产生 ΔP_{sysb} 后,初始 ROCOF 与 SSFD 的大小均位于电网要求的临界值附近,可见本文求取 ΔP_{sysb} 的方法是可靠的。

在已知 ΔP_{sysm} 的情况下,经式(9)和式(10)求得

表 1 不同风电渗透率的系统在 ΔP_{sysb} 下的频率响应

Table 1 Frequency response of system with different wind power penetrations at ΔP_{sysb}

$\xi / \%$	$\Delta P_{\text{sysb}} / \%$	$\Delta f_{\text{SI}} / \text{Hz}$	$(df/dt)_{\text{SI}} / (\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1})$
30	10.85	-0.194	-0.488
40	9.30	-0.193	-0.484
50	7.75	-0.193	-0.480
60	6.20	-0.194	-0.476
70	4.65	-0.192	-0.478

系统满足频率响应需求时风电渗透率的临界值 ξ_b ,在仿真中对风电渗透率为 ξ_b 附近的系统于 200 s 时设置功率增量 ΔP_{sysm} ,得到频率波形如附录 B 图 B2 所示,仿真结果和计算数据如表 2 所示(表中变量下标“TH”表示所求对象的理论值,后同)。由表中数据可知:理论求得算例系统的 $\xi_b = 35.5\%$,该风电渗透率下的系统在产生 ΔP_{sysm} 后的初始 ROCOF 为 -0.484 Hz/s,SSFD 为 -0.192 Hz,均接近于频率响应所允许的临界值;当 ξ 提高至 40.5% 时, ΔP_{sysm} 下的频率响应便不再满足电网要求。

表 2 不同风电渗透率的系统在 ΔP_{sysm} 下的频率响应

Table 2 Frequency response of system with different wind power penetrations at ΔP_{sysm}

$\xi / \%$	$\Delta f_{\text{TH}} / \text{Hz}$	$\Delta f_{\text{SI}} / \text{Hz}$	$(df/dt)_{\text{TH}} / (\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1})$	$(df/dt)_{\text{SI}} / (\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1})$
30.5	-0.186	-0.178	-0.464	-0.452
35.5	-0.200	-0.192	-0.500	-0.484
40.5	-0.217	-0.208	-0.542	-0.535

综上,在已知系统参数或风电渗透率的前提下,可以通过 ΔP_{sysb} 或 ξ_b 的求取对系统的抗扰能力进行评估,并为 ESS 的容量配置提供参考。

3.2 仿真算例 2

为了验证 ESS 配置的容量对其频率支撑效果的影响,算例 2 在 $\xi = 50\%$ 的系统中分别配置 P_{ESS} 为 20、30、40、50 MW 的 ESS, H_v 与 K_v 的取值分别固定为 0.4 与 5.0,设置系统在 200 s 时产生最大功率增量 ΔP_{sysm} ,得到系统在配置不同 ESS 容量下的频率响应波形如附录 B 图 B3 所示,仿真结果和计算数据如表 3 所示。ESS 的出力波形表明,ESS 能够在系统产生功率增量后快速地提供功率支撑并在较小的时间尺度后维持恒定。由表中 μ_k 与 μ_h 的取值可见,系统的 ROCOF 和 SSFD 均能在配置 ESS 后有效减小,且 ESS

表 3 ESS 配置容量对其频率响应贡献的影响

Table 3 Influence of ESS configuration capacity on its frequency response contribution

$P_{\text{ESS}} / \text{MW}$	$\mu_{k\text{TH}} / \text{Hz}$	$\mu_{k\text{SI}} / \text{Hz}$	$\mu_{h\text{TH}} / (\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1})$	$\mu_{h\text{SI}} / (\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1})$
20	0.039	0.040	0.080	0.091
30	0.054	0.054	0.113	0.118
40	0.068	0.067	0.143	0.149
50	0.079	0.078	0.169	0.165

配置容量越高,频率响应的改善效果越显著。

此外, μ_k 与 μ_h 关于 S_{ESS} 的变化规律与 2.2.2 节中理论分析的趋势相同,即在控制参数一定时,随着 ESS 容量的增加,ESS 对系统频率响应的调节速率逐渐降低。正因如此,ESS 的容量需要合理配置,以满足系统频率响应需求的同时提高调频的经济性。

3.3 仿真算例 3

为了在不同风电渗透率的系统中验证所提 ESS 配置方法的合理性,算例 3 分别以 ξ 为 40%、50%、60% 和 70% 的系统为例,按照 2.3 节中的方法配置 ESS,并对系统在 200 s 时产生 ΔP_{sysm} 后的情况进行仿真模拟,得到频率响应波形如附录 B 图 B4 所示,仿真结果和计算数据如表 4 所示。由表中数据可知,配置 ESS 后,不同风电渗透率的系统在 ΔP_{sysm} 下的 ROCOF 和 SSFD 均可以减小至电网要求的限值范围,当频率稳定时,ESS 提供的功率支撑即为 ΔP_{sysm} 与 ΔP_{sysk} 之差。

表 4 不同风电渗透率的系统配置 ESS 后在 ΔP_{sysm} 下的频率响应

Table 4 Frequency response of system with different wind power penetrations after allocating ESS at ΔP_{sysm}

$\xi / \%$	P_{ESS} / MW	$\Delta f_{SI} / \text{Hz}$	$(df/dt)_{SI} / (\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1})$
40	10.12	-0.198	-0.483
50	32.60	-0.196	-0.485
60	50.08	-0.196	-0.483
70	67.44	-0.195	-0.480

值得注意的是,附录 B 图 B4 中 ESS 出力的波形表明,ESS 的输出功率在 ΔP_{sysm} 产生初期可能存在一定的超调量。这是由于系统在产生功率波动后,各节点的频率响应不是完全同步的,冲击负荷功率在惯性响应之前由各调频机组按照电气距离分摊^[20]。考虑到上述原因与 ESS 惯性响应控制器输出的上升时间,本文将 200.1 s 作为系统初始 ROCOF 的参考时间,在保证测量精度的同时将仿真与理论间的误差控制在一定范围内。

3.4 仿真算例 4

为了分析和验证系统产生不同大小功率增量时 ESS 参与电网频率调控的动态过程及其调频性能,算例 4 以 $\xi=50\%$ 的系统为例,在 ΔP_{sys} 分别取总有功负荷的 6%、8%、10% 以及 12% 的情况下得到系统频率响应与 ESS 出力等波形如附录 B 图 B5 所示,由相关数据求取 ESS 在一次调频中对 SSFD 贡献的调节量和调频出力占比,如表 5 所示。由表中数据可知:当 $\Delta P_{sys} \leq \Delta P_{sysm}$ 时,SSFD 随 ΔP_{sys} 的增大呈线性增加趋势, μ_k 与 ΔP_{sys} 的大小接近呈正比关系, p_k 基本恒定;当 $\Delta P_{sys} > \Delta P_{sysm}$ 时,SSFD 的增长速率加快, μ_k 不再发生改变, p_k 明显减小。

因此,在系统功率增量小于等于 ESS 配置阶段

表 5 系统产生不同 ΔP_{sys} 时 ESS 的调频效果与支撑能力

Table 5 Frequency modulation effect and support capability of ESS at different values of ΔP_{sys}

ΔP_{sys}	μ_{kTH} / Hz	μ_{kSI} / Hz	p_{kTH}	p_{kSI}
6% P_{Load}	0.035	0.037	0.224 8	0.211 1
8% P_{Load}	0.046	0.046	0.224 8	0.210 1
10% P_{Load}	0.058	0.059	0.224 8	0.210 1
12% P_{Load}	0.058	0.060	0.187 4	0.175 1

所选取的最大功率增量时,该配置方法下的 ESS 能够按照设定的单位调节功率并以固定的出力占比承担系统的调频工作;当功率增量超过预设的限值时,ESS 的输出功率达到极限,调频性能下降。除此之外,仿真图中 ESS 及同步机的出力波形表明,3 阶 VSG 控制策略下的 ESS 具备和同步机相似的调节特性,能够在不同时间尺度下提供系统调频所需的有功支撑量,并在一定程度上补充潮流改变所需的无功调节量。

3.5 仿真算例 5

为对 ESS 参与电网调频的可控性与精度进行评估,算例 5 仍以 $\xi=50\%$ 的系统为例,通过改变 H_v 与 K_v 的取值分别对 H_{ESS} 与 K_{ESS} 进行调节,得到系统产生不平衡功率后的频率响应波形与 ESS 的出力波形见附录 B 图 B6、B7,调节效果见表 6、7。

表 6 ESS 在不同 H_v 下的调节效果

Table 6 Modulation effect of ESS at different values of H_v

ΔP_{sys}	H_v	H_{ESS} / s	$(df/dt)_{TH} / (\text{MW} \cdot \text{Hz}^{-1})$	$(df/dt)_{SI} / (\text{MW} \cdot \text{Hz}^{-1})$
5% P_{Load}	0.1	10	-0.302	-0.231
5% P_{Load}	0.5	50	-0.254	-0.226
5% P_{Load}	1.0	100	-0.207	-0.210
5% P_{Load}	2.0	200	-0.152	-0.203

表 7 ESS 在不同 K_v 下的调节效果

Table 7 Modulation effect of ESS at different values of K_v

ΔP_{sys}	K_v	$K_{ESS} / (\text{MW} \cdot \text{Hz}^{-1})$	$\Delta f_{TH} / \text{Hz}$	$\Delta f_{SI} / \text{Hz}$
5% P_{Load}	2	65.2	-0.115	-0.112
5% P_{Load}	5	163.0	-0.100	-0.098
5% P_{Load}	8	260.8	-0.088	-0.087
5% P_{Load}	11	358.6	-0.079	-0.079

显然,随着 H_v 或 H_{ESS} 的提高,系统在产生功率波动后的 ROCOF 不断降低。此外,仿真中的频率响应波形及 ESS 出力波形表明, H_v 的取值过大会延长系统的稳态恢复与 ESS 的出力波动时间, H_v 的取值不足又可能难以满足 ESS 对 ROCOF 的改善效果,因此, H_v 的大小不可盲目提高。

由表 6 中数据可知,仿真中 H_v 的变化对 ROCOF 的影响弱于理论计算所得结果,这意味着 ESS 实际贡献的惯性不完全等价于设定的 H_v 或 H_{ESS} 。产生上

述现象的主要原因是功率波动产生的瞬间,系统中各调频机组按照电气距离的反比分摊不平衡功率,故在同一扰动下,无论虚拟惯量如何配置,ESS的起始点功率都是相同的(这一点可在算例2和算例4中得到佐证)。因此在实际应用中, H_v 的调节效果会和理论存在一定误差,调节精度较低。同时,表7中的数据表明,仿真中的ESS在不同 K_v 下的频率调节效果与理论计算所得基本相同。因此,在容量允许的前提下,通过 K_v 或 K_{ESS} 的配置能够实现ESS对SSFD的精确调控。

最后,对比ESS在不同 H_v 与 K_v 取值下的仿真结果可得,在研究所讨论的范围内, H_v 与 K_v 的调节效果具有相互独立性,即 H_v 不会影响一次调频后SSFD的大小, K_v 亦不会对初始ROCOF产生明显作用,因此,二者可以根据频率支撑需求独立配置。

4 结论与展望

本文针对高风电渗透率系统产生功率增量后由于惯量缺失和调频能力不足导致的ROCOF和SSFD越限问题,提出了一种满足于电网频率支撑需求的ESS配置方法,得到以下结论。

1)以频率响应为限制条件,基于系统的惯性常数、调差系数等参数可以建立风电渗透率与最大功率增量的联系,由此为ESS投入的必要性及其容量配置的大小提供参考。

2)风电渗透率的提高导致系统消纳冗余功率的能力不断下降,也对ESS的配置容量提出了更高要求;此外,当系统中其他参数相同时,ESS对频率响应的调节速率随配置容量的增加而降低。

3)所提配置方法下的ESS具备和同步机相似的调频特性;当系统功率增量小于ESS配置过程所选取的最大功率增量时,ESS以固定占比分担不平衡功率;超出最大功率增量时,ESS的贡献力达到饱和,调频出力占比降低。

本文提出的ESS配置方法考虑了系统自身的频率调节能力,但忽略了电气距离和阻尼等因素的影响,因此ESS惯量配置结果的精度较低。此外,风电机组或其他类型的新能源机组在不同的控制方式与运行工况下对系统的调频工作也会产生不同作用,因此进一步的研究将在考虑系统动态频率分散性和风电机组调频特性的基础上展开。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 陈厚合,杜欢欢,张儒峰,等.考虑风电不确定性的混合储能容量优化配置及运行策略研究[J].电力自动化设备,2018,38(8):174-182,188.
CHEN Houhe, DU Huanhuan, ZHANG Rufeng, et al. Optimal capacity configuration and operation strategy of hybrid energy

storage considering uncertainty of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 174-182, 188.

[2] 艾青,刘天琪,印月,等.含大规模风电的高压直流送端系统多源协同调频策略[J].电力自动化设备,2020,40(10):56-63.
AI Qing, LIU Tianqi, YIN Yue, et al. Multi-source coordinated frequency regulation strategy for HVDC sending system with large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 56-63.

[3] 兰飞,潘益丰,时萌,等.双馈风电机组变系数虚拟惯量优化控制[J].电力系统自动化,2019,43(12):51-59.
LAN Fei, PAN Yifeng, SHI Meng, et al. Optimal variable-coefficient virtual inertia control for DFIG-based wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 51-59.

[4] 李颖颖,王德林,范林源,等.双馈风电机组限功率运行下频率稳定的变系数控制策略[J].电网技术,2019,43(8):2910-2917.
LI Yingying, WANG Delin, FAN Linyuan, et al. Variable coefficient control strategy for frequency stability of DFIG under power-limited operation[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2910-2917.

[5] 刘皓明,赵敏,田炜,等.风、浪对海上风电机组振动特性的影响及控制策略[J].电力自动化设备,2020,40(1):46-51,58.
LIU Haoming, ZHAO Min, TIAN Wei, et al. Effect of wind and wave on vibration characteristics of offshore wind turbines and control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 46-51, 58.

[6] 李生虎,蒋以天,于新钰,等.考虑DFIG桨距角参数优化的小干扰稳定约束最优潮流模型[J].电力自动化设备,2019,39(11):20-26.
LI Shenghu, JIANG Yitian, YU Xinyu, et al. Small-signal stability constrained optimal power flow model considering optimization of DFIG pitch angle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 20-26.

[7] 颜湘武,崔森,宋子君,等.基于超级电容储能控制的双馈风电机组惯量与一次调频策略[J].电力系统自动化,2020,44(14):111-120.
YAN Xiangwu, CUI Sen, SONG Zijun, et al. Inertia and primary frequency regulation strategy of doubly-fed wind turbine based on super-capacitor energy storage control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 111-120.

[8] 颜湘武,宋子君,崔森,等.基于变功率点跟踪和超级电容器储能协调控制的双馈风电机组一次调频策略[J].电工技术学报,2020,35(3):530-541.
YAN Xiangwu, SONG Zijun, CUI Sen, et al. Primary frequency regulation strategy of doubly-fed wind turbine based on variable power point tracking and supercapacitor energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 530-541.

[9] 朱三立,卢继平,梁沛.超级电容在风电场相变储输一体化系统中的应用及特性分析[J].电网技术,2017,41(8):2632-2639.
ZHU Sanli, LU Jiping, LIANG Pei. Application and characteristic analysis of phase-change energy storage and generating system in wind farm with super capacitors[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2632-2639.

[10] 李欣然,崔曦文,黄际元,等.电池储能电源参与电网一次调频的自适应控制策略[J].电工技术学报,2019,34(18):3897-3908.
LI Xinran, CUI Xiwen, HUANG Jiyuan, et al. The self-adaption control strategy of energy storage batteries participating in the primary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3897-3908.

[11] 孟建辉,彭嘉琳,王毅,等.考虑储能荷电状态及频率恢复特性

- 的改进型灵活虚拟惯性控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 100-107, 114, 108-111.
- MENG Jianhui, PENG Jialin, WANG Yi, et al. Improved flexible virtual inertial control considering SOC of energy storage and characteristics of frequency recovery[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 100-107, 114, 108-111.
- [12] 陈萌, 肖湘宁, 袁敞, 等. 基于三阶模型的虚拟同步发电机控制策略[J]. 现代电力, 2017, 34(5): 57-63.
- CHEN Meng, XIAO Xiangning, YUAN Chang, et al. The control strategy of virtual synchronous generator based on three-order model[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(5): 57-63.
- [13] 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 Guowei, et al. Third-order synchronous machine model based active support control of battery storage power plant and its contribution analysis for primary frequency response[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4854-4866.
- [14] DELILLE G, FRANCOIS B, MALARANGE G. Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system's inertia[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 931-939.
- [15] ZHAO H Y, HONG M G, LIN W, et al. Voltage and frequency regulation of microgrid with battery energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 414-424.
- [16] 胡文强, 吴在军, 孙充勃, 等. 基于VSG的储能系统并网逆变器建模与参数整定方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 13-23.
- HU Wenqiang, WU Zaijun, SUN Chongbo, et al. Modeling and parameter setting method for grid-connected inverter of energy storage system based on VSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 13-23.
- [17] YUE M, WANG X Y. Grid inertial response-based probabilistic determination of energy storage system capacity under high solar penetration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 1039-1049.
- [18] KNAP V, CHAUDHARY S K, STROE D I, et al. Sizing of an energy storage system for grid inertial response and primary frequency reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3447-3456.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电化学储能系统储能变流器技术规范: GB/T 34120—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [20] 孙大卫, 刘辉, 赵峰, 等. 不同逆变电源主动支撑控制方式的对比研究[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4359-4369.
- SUN Dawei, LIU Hui, ZHAO Feng, et al. Comparison of inverter generators with different support control methods[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4359-4369.

作者简介:



刘洪波

刘洪波(1973—),女,吉林吉林人,教授,博士,主要研究方向为电力系统规划运行、电力系统稳定与控制(E-mail: 690760474@qq.com);

张崇(1997—),男,辽宁锦州人,硕士研究生,主要研究方向为储能系统参与电网调频的控制与分析(E-mail: neepu1997@163.com)。

(编辑 王欣竹)

Configuration method of energy storage system considering grid frequency support demand under high wind power penetration

LIU Hongbo¹, ZHANG Chong¹, SUN Tong², PENG Xiaoyu¹, ZHANG Shuyu¹

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. State Grid Jilin Electric Power Company, Changchun 130000, China)

Abstract: A configuration method of energy storage system considering the grid frequency support demand under high wind power penetration is proposed. The frequency change rate and the frequency deviation are taken as the restricted conditions to establish the relationship between the maximum power increment that the new energy system can withstand and the known parameters such as equivalent inertia constant, adjustment coefficient, wind power permeability, and so on. The capacity and control parameters of the energy storage system under the control strategy of the third-order virtual synchronous generator are quantitatively configured to improve the ability of different wind power penetration system for absorbing unbalanced power. Taking the unit power regulation contributed by the energy storage system as a reference, the frequency response contribution, frequency modulation output ratio and output power characteristics of the configuration method are described and analyzed when different power increments are generated. The simulative results show that the energy storage system under this configuration method has strong controllability, which can provide the active power regulation required by the grid more accurately, so as to effectively improve the wind power grid environment.

Key words: high wind power penetration; frequency support demand; maximum power increment; energy storage configuration; unit power regulation

附录 A

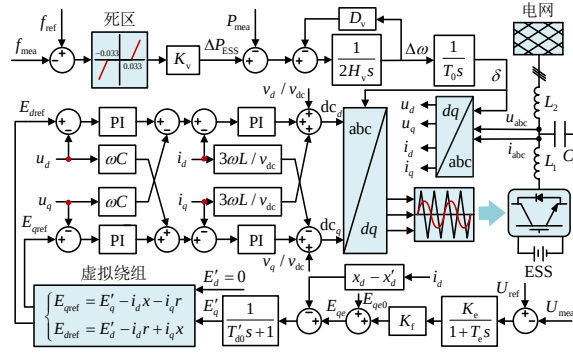


Fig.A1 Control block diagram of third-order VSG

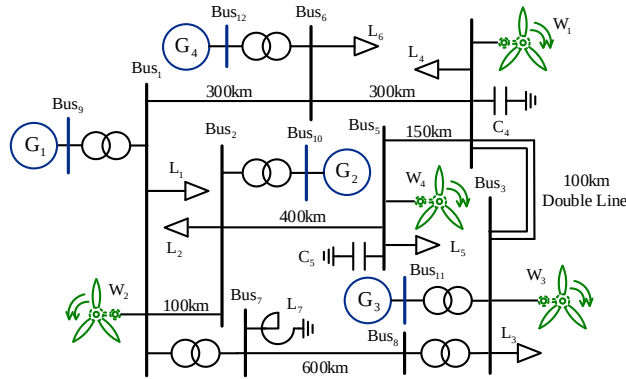


Fig.A2 12-bus power system

附录 B

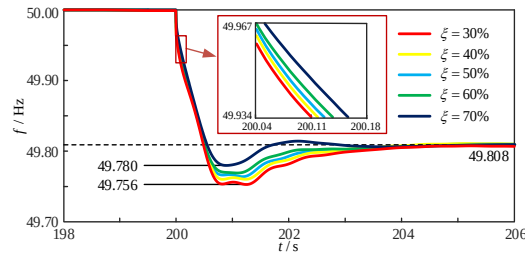


Fig.B1 Frequency response of system with different wind power penetrations at ΔP_{sysb}

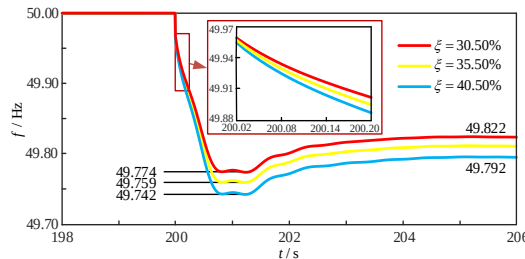


Fig.B2 Frequency response of system with different wind power penetrations at ΔP_{sysm}

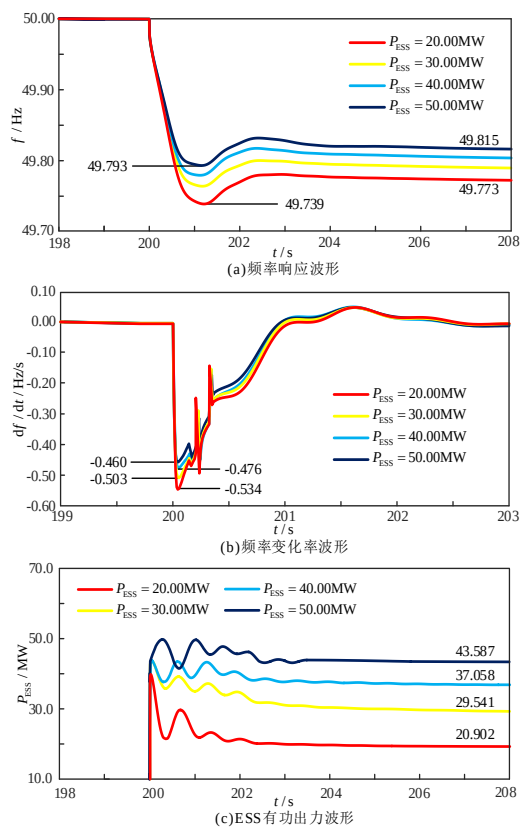


图 B3 系统配置不同容量储能后的仿真波形

Fig.B3 Simulative waveforms of system with different ESS capacities

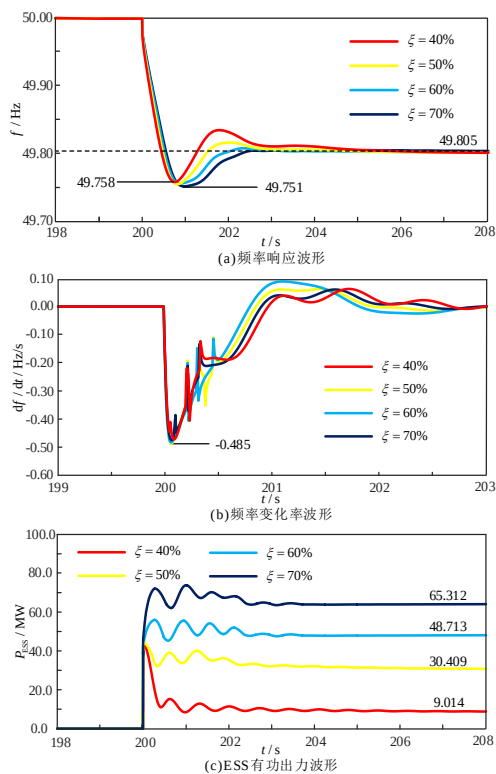


图 B4 不同风电渗透率系统配置 ESS 后的仿真波形

Fig.B4 Simulative waveforms of system with different wind power penetrations after ESS configuration

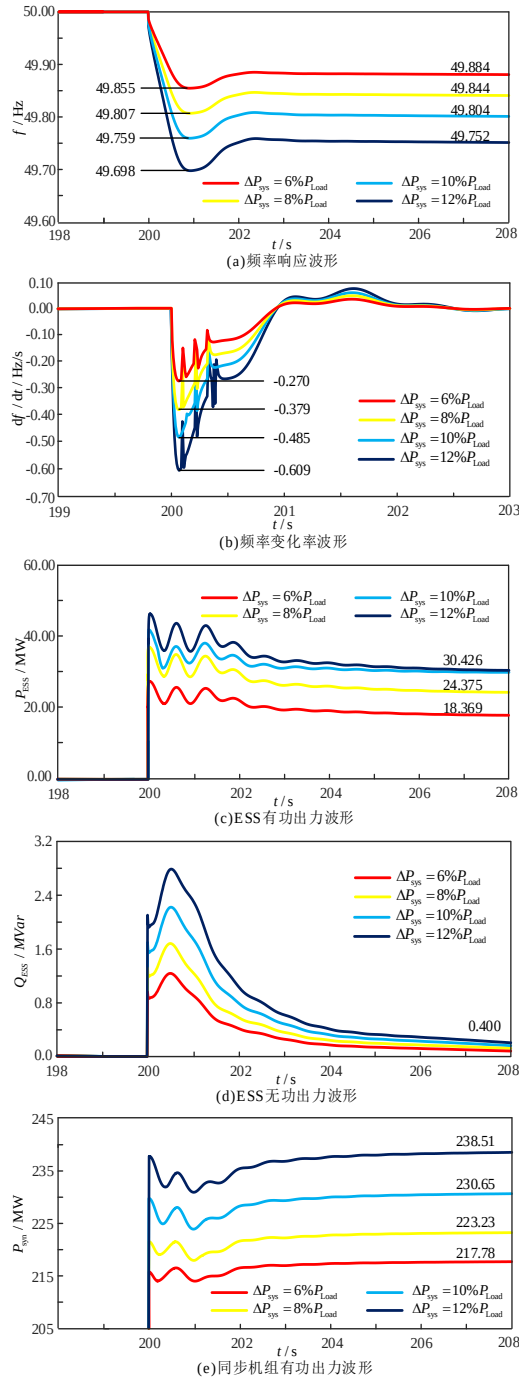


图 B5 系统在不同 ΔP_{sys} 下的仿真波形

Fig.B5 Simulative waveforms of system at different ΔP_{sys} values

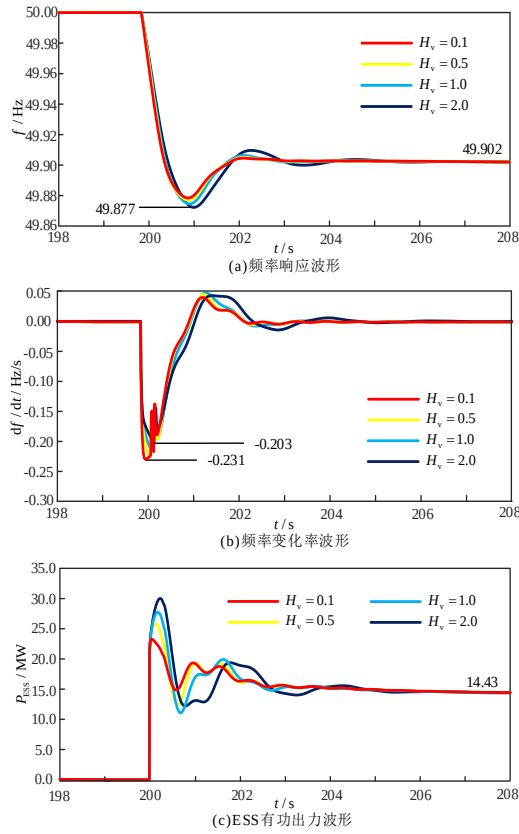


图 B6 系统在不同 H_v 下的仿真波形

Fig.B6 Simulative waveforms of system at different H_v values

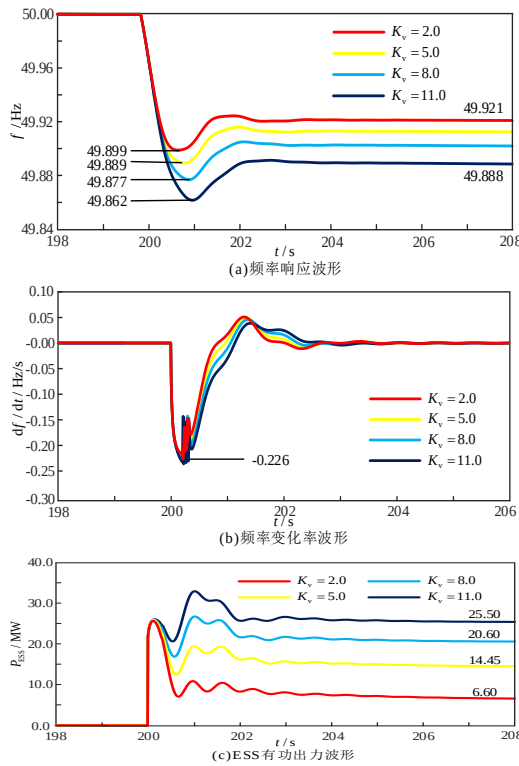


图 B7 系统在不同 K_v 下的仿真波形

Fig.B7 Simulative waveforms of system at different K_v values