

基于有功不平衡指标的储能快速调频方法

樊海锋¹, 刘文龙², 苏大威³, 余璟³

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京市 211103;

2. 浙江大学电气工程学院, 杭州市 310027;

3. 国网江苏省电力有限公司, 南京市 210024)

摘要: 因主流变速风电机组有功控制一般不主动参与频率调节, 大规模风电并网对电力系统快速调频提出了挑战。储能系统具备有功功率快速响应优势, 可改善系统动态频率响应特性, 该文提出了一种基于有功不平衡指标的储能快速调频方法。首先, 定义了频率跌落阶段和恢复阶段系统有功不平衡指标。其次, 设计了自适应模糊逻辑控制策略, 依据系统有功不平衡指标和频率偏差动态调整储能系统在频率跌落阶段和恢复阶段的有功出力。最后, 通过算例分析验证了所提出的储能快速调频控制方法的有效性, 与常规比例微分 (proportional differential, PD) 控制方法相比, 可减少储能系统容量需求, 且对不同工况具有较好的灵活性和适应性。

关键词: 快速调频; 储能系统 (ESS); 模糊逻辑; 不平衡指标

Fast Frequency Regulation Method Based on Unbalanced Power Index Using Energy Storage System

FAN Haifeng¹, LIU Wenlong², SU Dawei³, YU Jing³

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

ABSTRACT: As most variable speed wind power generators scarcely respond to frequency variation actively, large-scale wind power integration brings challenge to the fast frequency regulation of power system. With the advantage of fast response, energy storage system (ESS) can be used to improve dynamic frequency response of power system. A fast frequency regulation method based on unbalanced power index using ESS is proposed in this paper. Firstly, unbalanced power indices in the stages of frequency fall and recovery are defined. Secondly, an adaptive fuzzy logic control strategy is designed to adjust power output of ESS in the stages of frequency fall and recovery according to unbalanced power index and frequency deviation. Finally, compared to proportional differential (PD) control, the proposed method can reduce capacity demand of ESS and be more flexible and adaptable to different operating conditions, which is verified by case studies.

This work is supported by National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (No. 51607092) and State Grid Corporation of China Research Program (No. J2017046).

KEYWORDS: fast frequency regulation; energy storage system (ESS); fuzzy logic; unbalanced power index

中图分类号: TM 761

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2018)10-0106-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2018.10.013

0 引言

主流变速风电机组有功功率控制与系统频率解耦^[1-3], 大规模风电接入电力系统后, 当发生故障事件如机组跳闸、直流闭锁^[4-5]等时, 系统频率将快速跌落, 可能会引起低频减载装置动作^[6]。储能系统具

有功功率快速响应的技术优势^[7-8], 可快速响应系统频率变化^[9-10], 提高含高渗透率风电电力系统快速调频能力。

关于储能快速调频控制方法, 文献[11-12]提出了基于比例控制的储能调频策略, 模拟常规机组的一次调频。文献[13-14]综合了比例控制和微分控制, 使储能系统模拟常规机组的惯性响应和一次调频。文献[15]提出了基于自适应参数调整的储能调频控

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51607092); 国家电网公司科技项目(J2017046)

制方法,在调频过程中实时优化比例微分 (proportional differential, PD) 控制参数。文献 [16] 提出了基于模型预测控制的储能调频控制方法,在频率恢复阶段优化储能调频功率。但是,文献 [11-14] 中若控制参数整定值较小,储能快速调频功率不足;而控制参数整定值较大,储能调频响应功率过大,则对储能容量需求较大。文献 [15] 优化模型中所使用的系统频率特性模型比较简化,尚未应用到多机系统。文献 [16] 中系统频率特性模型参数辨识方法对初值比较敏感。

针对于上述不足,本文提出一种基于有功不平衡指标的储能快速调频控制方法。首先通过定义电力系统有功不平衡指标,表征系统频率跌落和恢复阶段的有功不平衡程度,然后综合不平衡指标和系统频率偏差两方面信息,依据设计的模糊逻辑策略,灵活、实时地调整储能不同阶段参与系统快速调频的有功出力。

1 电力系统有功不平衡指标

电力系统具有固有频率特性,经差分化,可得系统动态频率的递推公式,如式(1)所示^[17]。

$$\Delta f^t = k_1 \Delta f^{t-\Delta t} + k_2 P_u^{t-\Delta t} \quad (1)$$

$$k_1 = e^{-(D_L/M_{eq}) \Delta t} \quad (2)$$

$$k_2 = (1 - e^{-(D_L/M_{eq}) \Delta t}) / D_L \quad (3)$$

$$P_u^{t-\Delta t} = -P_{loss} + \Delta P_G^{t-\Delta t} + \Delta P_W^{t-\Delta t} + P_e^{t-\Delta t} = P_{u,p}^{t-\Delta t} + P_e^{t-\Delta t} \quad (4)$$

式中: Δf 为系统频率偏差(相对额定频率 50 Hz); Δt 为时间步长; M_{eq} 为系统等效惯量; D_L 为负荷频率调节效应系数; P_u 、 P_{loss} 、 ΔP_W 、 ΔP_G 、 P_e 、 $P_{u,p}$ 分别为系统总不平衡功率、系统故障损失功率、风电机组有功增量(相对故障前平衡状态)、常规机组有功增量(相对故障前平衡状态)、储能系统有功功率和系统侧不平衡功率。

在储能没有参与调频情况下,当系统发生故障如机组跳闸时,系统频率变化典型轨迹^[18]如图 1 所示。可见系统频率在最低点和新稳态时,其变化率等于零,即 $\Delta f^t = \Delta f^{t-\Delta t}$,由式(1)可知系统在频率最低点和稳态时,系统侧不平衡功率如式(5)、(6)所示。

$$P_{u,p,m} = \frac{(1 - k_1)}{k_2} \Delta f_d \quad (5)$$

$$P_{u,p,s} = \frac{(1 - k_1)}{k_2} \Delta f_s \quad (6)$$

式中 Δf_d 、 Δf_s 分别为系统频率最大偏差和稳态偏差。 Δf_d 可设定为系统启动低频减载对应的频率偏差阈值 Δf_{UFLS} 。而 Δf_s 的大小取决于系统故障损失功率、系统

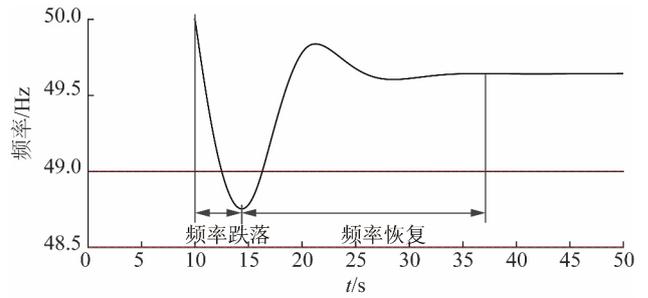


图 1 系统故障后频率变化典型曲线
Fig. 1 Typical curve of system frequency after contingency occurrence

等效调差系数 R_{eq} 和负荷频率调节效应系数 D_L ^[19-20], 如式(7)所示。

$$\Delta f_s = \frac{-P_{loss}}{1/R_{eq} + D_L} \quad (7)$$

为了使储能快速调频方法可适应系统不同故障扰动情况,将系统侧不平衡功率进行归一化处理,如式(8)所示。

$$\gamma_{u,p} = -P_{u,p} / P_{loss} \quad (8)$$

式中 $\gamma_{u,p}$ 为系统侧有功不平衡率(后文简称“不平衡率”)

进而,由式(5) — (8) 可得到在频率最低点和稳态时有功不平衡率,如式(9)、(10)所示。

$$\gamma_{u,p,m} = -\frac{(1 - k_1) \Delta f_{UFLS}}{k_2 P_{loss}} \quad (9)$$

$$\gamma_{u,p,s} = -\frac{(1 - k_1) \Delta f_s}{k_2 P_{loss}} = \frac{(1 - k_1)}{k_2 (1/R_{eq} + D_{eq})} \quad (10)$$

式中: $\gamma_{u,p,m}$ 为系统频率最低点时有功不平衡率; $\gamma_{u,p,s}$ 为系统频率稳态时有功不平衡率。

$\gamma_{u,p,m}$ 、 $\gamma_{u,p,s}$ 可分别作为频率跌落阶段与频率恢复阶段的有功不平衡率参考点。基于上述 2 个参考点,提出系统有功不平衡指标,分别如式(11)、(12)所示,用来描述系统故障后在频率变化不同阶段的有功不平衡程度。

$$d_{u,p,m} = \frac{\gamma_{u,p} - \gamma_{u,p,m}}{1 - \gamma_{u,p,m}} \quad (11)$$

$$d_{u,p,s} = \frac{\gamma_{u,p} - \gamma_{u,p,s}}{\gamma_{u,p,s} - \gamma_{u,p,m}} \quad (12)$$

式中: $d_{u,p,m}$ 为频率跌落阶段有功不平衡指标; $d_{u,p,s}$ 为频率恢复阶段有功不平衡指标; $\gamma_{u,p,r}$ 为系统从频率跌落阶段转为恢复阶段时对应的不平衡率。

$d_{u,p,m}$ 可表征频率跌落阶段系统有功扰动程度,用于确定在频率跌落阶段储能快速调频的投入时机与有功出力。故障发生后,系统有功不平衡指标较大,此时储能快速投入并向电网注入较大有功功率,弥补在频率跌落阶段常规机组因爬坡有限而一

次调频响应不足的缺点,减小系统频率跌落速率和最大偏差,从而降低系统发生低频减载概率。 $d_{u,p,s}$ 可表征频率恢复阶段系统有功恢复程度,用于确定在频率恢复阶段储能快速调频的有功出力与退出时机。在频率恢复阶段,随着常规机组一次调频进一步响应,系统有功不平衡指标和系统频率偏差将逐渐减小,此时相应减小储能调频功率,充分发挥常规机组一次调频的容量优势。当有功不平衡指标接近0(即系统不平衡率接近 $d_{u,p,s}$)时,储能系统退出快速调频,系统最终依靠常规机组一次调频能力,将系统频率恢复至新稳态点。因此,在频率变化不同阶段有功不平衡指标的应用,有利于实现储能参与系统快速调频过程中有功出力的灵活调整;在频率跌落阶段弥补常规机组一次调频响应不足;在频率恢复阶段协同常规机组一次调频,从而在满足系统快速调频需求基础上,实现储能系统高效运行,减小其容量需求。

2 储能系统快速调频方法

2.1 储能系统快速调频构架

储能系统作为调频电源,其快速调频控制策略如图2所示。首先获得电力系统频率和发电机节点功率信息,然后计算系统频率偏差和系统有功不平衡指标,最后根据所设计模糊逻辑策略和储能系统运行模型,得到储能参与系统快速调频的有功出力。

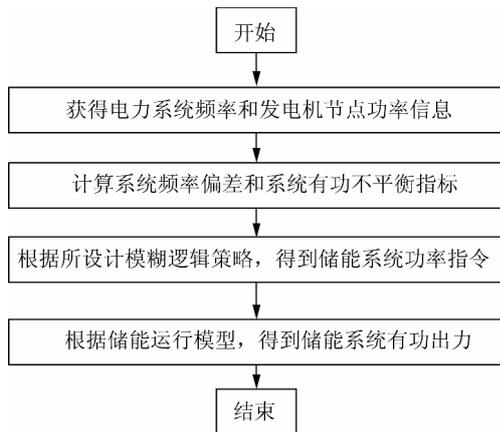


图2 储能快速调频控制策略
Fig. 2 Control strategy of fast frequency regulation with ESS

2.2 储能系统运行模型

为了延长使用寿命和保证安全运行,储能系统有功出力 P_e^t 需要限制在一定范围内,如式(13)所示。该运行范围取决于储能系统剩余能量状态^[21]、充放电效率、变流器设计容量等,如式(14)、(15)所示。

储能系统剩余能量可由式(16)获得。

$$P_e^t = \begin{cases} P_{\max} & P_e^t > P_{\max} \\ P_{\min} & P_{\min} \leq P_e^t \leq P_{\max} \\ P_{\min} & P_e^t < P_{\min} \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{\max} = \max\{(E^t - E_{\min}) / (\Delta t \cdot \eta_d), P_{e,\max}\} \quad (14)$$

$$P_{\min} = \min\{(E_{\max} - E^t) \cdot \eta_c / (\Delta t), -P_{e,\max}\} \quad (15)$$

$$E^t = \begin{cases} E^{t-\Delta t} - P_e^{t-\Delta t} \cdot \Delta t / \eta_d & P_e^{t-\Delta t} \geq 0 \\ E^{t-\Delta t} - P_e^{t-\Delta t} \cdot \Delta t \cdot \eta_c & P_e^{t-\Delta t} < 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: P_{\max} 为储能系统最大功率; P_{\min} 为储能系统最小功率; $P_{e,\max}$ 为储能系统变流器功率设计容量; E^t 为储能系统在 t 时刻剩余能量; E_{\max} 、 E_{\min} 分别为为储能系统剩余能量上、下限; η_c 、 η_d 分别为储能系统充、放电效率。

2.3 模糊逻辑策略

本文通过设计模糊逻辑策略,自适应调整储能系统快速调频的有功出力,提高电力系统快速调频能力。模糊逻辑输入量为有功不平衡指标和系统频率偏差,输出量为储能系统调频有功输出比例,如式(17)、(18)所示。储能系统参与快速调频有功出力如式(19)、(20)所示。

$$\alpha_m = f(d_{u,p,m}, -\Delta f) \quad (17)$$

$$\alpha_s = f(d_{u,p,s}, -\Delta f) \quad (18)$$

$$P_{e,m} = \alpha_m P_{e,\max} \quad (19)$$

$$P_{e,s} = \alpha_s P_{e,\max} \quad (20)$$

式中: α_m 、 α_s 分别为频率跌落阶段与恢复阶段储能系统有功出力比例; $f(\cdot)$ 为模糊逻辑映射关系; $P_{e,m}$ 、 $P_{e,s}$ 分别为频率跌落阶段与恢复阶段储能有功功率; $P_{e,\max}$ 为系统频率从跌落阶段进入恢复阶段时储能系统有功功率。在频率恢复阶段,将储能最大放电功率设置为 $P_{e,\max}$,有利于储能有功功率在频率从跌落阶段到恢复阶段切换过程中平滑过渡。

模糊逻辑策略包含3个单元:模糊化、模糊推理、反模糊化。

(1) 模糊化:将输入输出量的具体数值转化为模糊变量,可通过定义隶属度函数来完成上述转化。本文将输入量和输出量划分为5个等级:Z、S、M、L、O。同时,隶属度函数采用高斯型、S型和Z型函数3种类型。输入量、输出量的隶属度函数分别如图3—6所示。因为在频率跌落和恢复阶段常规机组一次调频响应程度有所差异,所以频率跌落和恢复阶段有功不平衡指标的隶属度函数的范围划分存在不同,如图3、4所示,有利于指导储能系统参与快速调频的投入、退出以及有功功率调整。

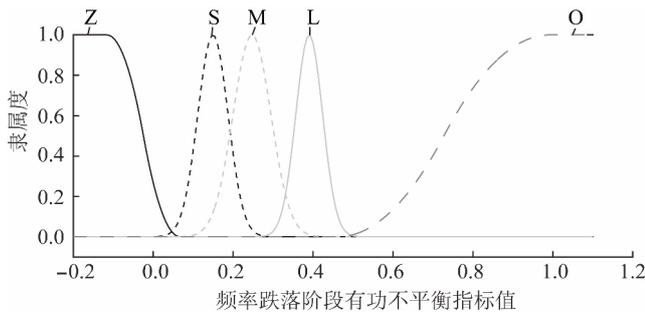


图 3 频率跌落阶段有功不平衡指标的隶属度函数
Fig. 3 Membership function of unbalanced power index during frequency fall

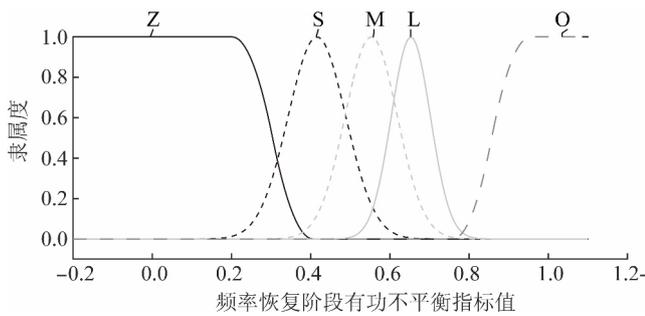


图 4 频率恢复阶段有功不平衡指标的隶属度函数
Fig. 4 Membership function of unbalanced power index during frequency recovery

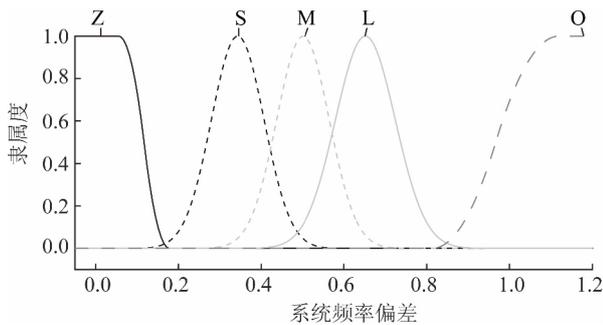


图 5 系统频率偏差的隶属度函数
Fig. 5 Membership function of frequency deviation

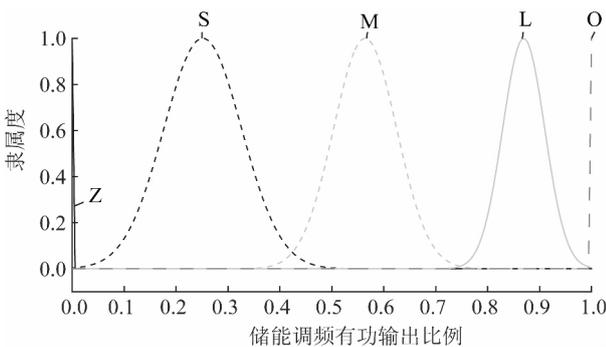


图 6 储能调频有功输出比例的隶属度函数
Fig. 6 Membership function of the ratio of ESS power for fast frequency regulation

(2) 模糊推理: 考虑到本小节(1)中输入量、输出量隶属度函数, 设计了 25 条逻辑推理规则, 涵盖了模糊逻辑输入量与输出量的所有可能组合情况, 如表 1 所示。在有功不平衡指标较大时, 储能系统注入较大的有功功率, 减缓系统频率跌落(频率跌落阶段)或防止发生二次快速跌落(频率恢复阶段); 当不平衡指标较小时, 随着频率偏差减小, 储能系统注入较小的有功功率, 减小储能系统容量需求。

表 1 储能快速调频的模糊逻辑规则
Table 1 Fuzzy logic rules for emergent frequency regulation with ESS

$\alpha_m(\alpha_s)$	Δf				
	Z	S	M	L	O
$d_{u,m}(d_{u,s})$	Z	Z	Z	Z	S
	S	Z	Z	Z	M
	M	Z	S	M	O
	L	L	L	O	O
	O	O	O	O	O

(3) 反模糊化: 将模糊变量转化为具体数值的过程。利用“重心法”^[22]对输出量进行反模糊化处理, 得到储能参与系统快速调频的有功出力比例。

3 算例分析

3.1 测试系统

本文采用 IEEE 3 机 9 节点系统^[23], 并在节点 8 接入风电场, 如图 7 所示。

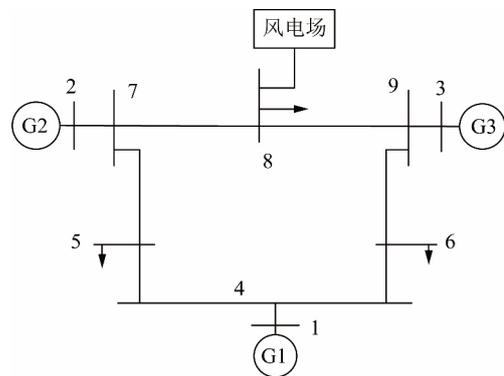


图 7 改进的 IEEE 3 机 9 节点系统
Fig. 7 Modified IEEE 3-machines 9-bus power system

系统具有 3 台常规发电机组, 其中, G1 为水电机组, G2、G3 为火电机组。G1、G2、G3 机组成装机容量分别为 230, 140, 120 MW, 惯性时间常数分别为 23.64, 6.40, 3.01 s^[23], 一次调频调差系数分别为 4%, 5%, 5%, 负荷频率调节效应系数为 1%^[19]。风电场装机容量为 125 MW, 其渗透率约为 20%。在

本文中,低频减载启动的频率阈值为 49 Hz。本文主要研究系统快速调频方法,在电力系统频率仿真中暂不考虑二次调频。储能系统额定功率为 30 MW。

3.2 储能快速调频效果

在算例中,本文方法将与常见的 PD 控制方法(如式(21)),进行调频效果对比分析。

$$P_e = -p_1 \Delta f - p_2 \frac{d\Delta f}{dt} \quad (21)$$

式中: P_e 为储能系统有功指令; p_1 、 p_2 分别为相应的控制参数。

假设在 4 s 时,系统火电机组 G3 发生故障并切除,此时系统损失发电功率 70 MW。对于此情况,在本文方法和 PD 控制方法($p_1 = 15$, $p_2 = 45$)下,系统频率变化、储能有功曲线、系统有功不平衡指标分别如图 8—10 所示,储能参与系统快速调频效果如表 2 所示。

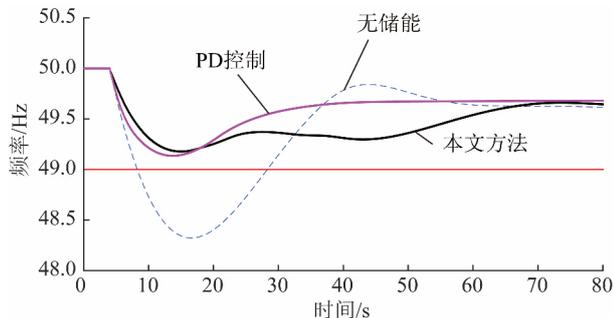


图 8 不同控制方式下系统频率曲线

Fig. 8 System frequency curves after an outage with different methods

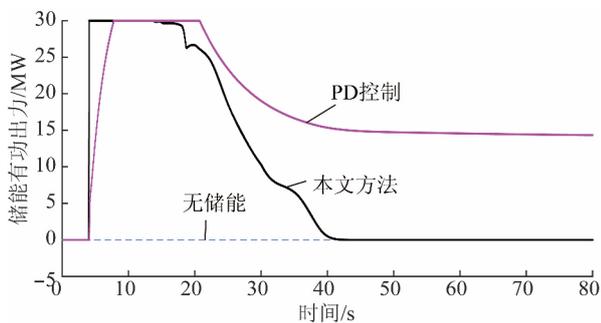


图 9 不同控制方式下储能系统功率曲线

Fig. 9 ESS power output with different methods

表 2 不同控制方式调频效果对比结果

Table 2 Control performance with different methods

控制方法	频率最低点/Hz	储能使用容量/(MW·h)
无储能	48.32	0.00
本文方法	49.18	0.22
PD 控制	49.14	0.44

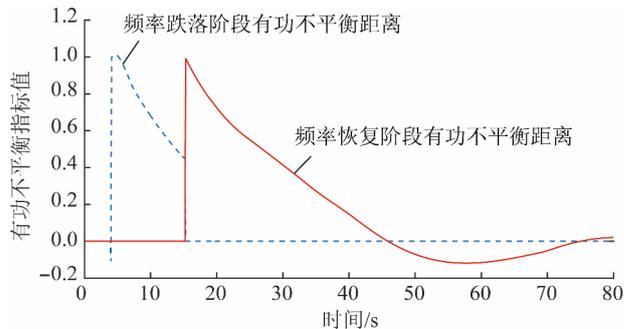


图 10 有功不平衡指标

Fig. 10 Unbalanced power index in different stages

由图 8 可知,当没有储能参与系统快速调频时,系统发生故障后频率快速下跌,最低点达 48.32 Hz,低于低频减载的启动阈值 49 Hz,系统将自动切除负荷。在本文方法和 PD 控制方法下,系统频率最低点得到较大改善,分别提高至 49.18 Hz 与 49.14 Hz,可满足系统快速调频需求。同时,由图 9、10 可知,在本文方法作用下,储能系统有功出力随着系统有功不平衡指标变化进行调整,在频率跌落阶段,储能系统快速注入功率,在频率恢复阶段,储能系统逐渐退出调频,系统可依靠常规机组一次调频能力进行频率恢复;而在 PD 控制方法下,储能系统一直保持功率注入,故其储能容量需求较高。由表 2 可知,本文方法下储能使用容量仅为 PD 控制方法的 50%,提高了储能系统运行的经济性。

算例结果说明,本文方法可以有效改善系统快速调频效果,同时减小储能系统容量需求。

3.3 不同工况对比

电力系统运行方式、故障类型等会发生改变,储能系统快速调频方法需要对不同工况具有适应性。本小节基于不同工况,对本文方法和 PD 控制方法(控制参数与 3.2 中相同)进行对比分析。不同工况具体设置如下:

工况 1: 风电场故障脱网,损失有功功率 94 MW;

工况 2: 水电机组 G1 故障并切除,损失有功功率 58 MW;

工况 3: 改变 G1、G2、G3 运行点,火电机组 G2 发生故障并切除,损失有功功率 72 MW。

对于上述 3 种工况,在本文方法和 PD 控制方法下,系统频率最低点,如图 11 所示。可见,对于 PD 控制方法,只有在工况 1 下系统频率最低点高于 49 Hz,不会发生低频减载,但在其他工况均不能满足快速调频需求。而在本文调频方法下,对于上述 3 种工况,系统频率最低点均在 49 Hz 以上,都可以满足系统快速调频需求。

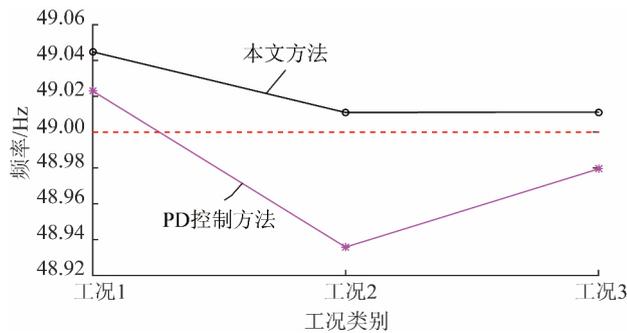


图 11 不同工况下频率最低点对比

Fig. 11 The comparison of system frequency nadir under different operating conditions

同时,对于上述 3 种工况,2 种调频方法下储能使用容量如图 12 所示。可见,对于每一种工况,本文方法均可取得较少的储能使用容量。如工况 2,本文方法比 PD 控制方法可节约储能系统容量 $0.34 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 。

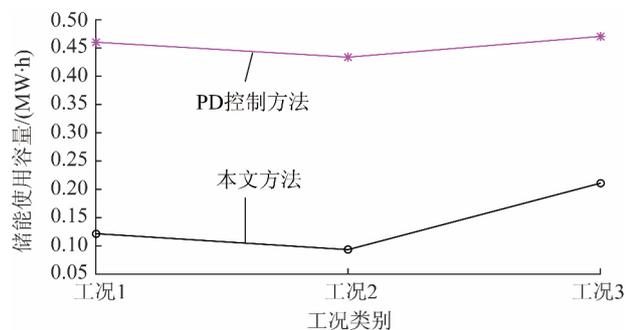


图 12 不同工况下储能使用容量对比

Fig. 12 Comparison of capacity used of ESS under different operating

算例结果表明,本文提出的储能快速调频方法对不同工况具有较好的适应性。

4 结 论

(1) 系统有功不平衡指标信息,可有效辅助储能系统在频率跌落和恢复阶段进行有功功率调整。

(2) 与 PD 控制方法相比,本文所提方法调整储能功率更灵活,在满足系统快速调频需求下,可节约 50% 储能使用容量。

(3) 在不同系统工况下,本文方法储能使用容量较小,并可有效将频率控制在 49 Hz 以上,对不同系统工况表现出较好的适应性。

5 参考文献

[1] 李建林,杨水丽,高凯. 大规模储能系统辅助常规机组调频技术分析[J]. 电力建设, 2015, 36(5): 105-110.

LI Jianlin, YANG Shuli, GAO Kai. Frequency modulation technology for conventional units assisted by large scale energy storage system [J]. Electric Power Construction, 2016, 35(5): 23-42.

[2] 苗福丰,唐西胜,齐智平. 储能参与风电一次调频的容量优化[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(4): 23-29, 42.

MIAO Fufeng, TANG Xisheng, QI Zhiping. Capacity optimization of energy storage participating to wind plant primary frequency regulation [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(4): 23-29, 42.

[3] 严干贵,王昱博,钟诚,等. 风储联合系统调频控制策略研究[J]. 电力建设, 2016, 37(12): 55-60.

YAN Gangui, WANG Yubo, ZHONG Cheng, et al. Frequency control strategy for wind storage combined system [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(12): 55-60.

[4] 李虎成,袁宇波,卞正达,等. 面向特高压交直流大受端电网的频率紧急控制特性分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 27-31.

LI Hucheng, YUAN Yubo, BIAN Zhengda, et al. The frequency emergency control characteristic analysis for UHV AC/DC large receiving end power grid [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 27-31.

[5] 曾鉴,叶希,翟小斌,等. 异步互联格局下川渝送端电网的频率稳定特性与控制策略[J]. 电力建设, 2018, 39(1): 68-75.

ZENG Jian, YE Xi, ZHAI Xiaobin, et al. Frequency stability characteristics and control strategies for Chuanyu transmission network after asynchronous interconnection [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(1): 68-75.

[6] 李顺,廖清芬,刘涤尘. 基于 WAMS 的自适应低频减载动态优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 48-54.

LI Shun, LIAO Qingfen, LIU Dichen. WAMS based dynamic optimization of adaptive under-frequency load shedding [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 48-54.

[7] 胡泽春,丁华杰,宋永华,等. 能源互联网背景下储能应用的研究现状与展望[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 8-17.

HU Zechun, DING Huajie, SONG Yonghua, et al. Research status and prospect of energy storage application under energy internet background [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 8-17.

[8] 苏小林,李丹丹,阎晓霞,等. 储能技术在电力系统中的应用分析[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 24-32.

SU Xiaolin, LI Dandan, YAN Xiaoxia, et al. Application analysis of energy storage technology in power system [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 24-32.

[9] 江全元,龚裕仲. 储能技术辅助风电并网控制的应用综述[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3360-3368.

JIANG Quanyuan, GONG Yuzhong. Review of wind power integration control with energy storage technology [J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3360-3368.

[10] 唐西胜. 储能在电力系统中的作用与运营模式[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 2-7.

TANG Xisheng. Applications and marketing mode of energy storages in power system [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 2-7.

[11] STORE D I, KNAP V, SWIERCZYNSKI M, et al. Operation of a

- grid-connected lithium-ion battery energy storage system for primary frequency regulation: A battery lifetime perspective [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1): 430-438.
- [12] WU L, CUI Z, Gao W, et al. A novel frequency regulation strategy with the application of energy storage system for large scale wind power integration [C]//Green Technologies Conference. New Orleans, LA, USA, 2015: 221-226.
- [13] SEBASTIAN R. Application of a battery energy storage for frequency regulation and peak shaving in a wind diesel power system [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(3): 764-770.
- [14] 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.
- [15] TORRES L M A, LOPES L A C, MORÁN T L A, et al. Self-tuning virtual synchronous machine: a control strategy for energy storage systems to support dynamic frequency control [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 833-840.
- [16] PULENDRAN S, TATE J E. Energy storage system control for prevention of transient under-frequency load shedding [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 927-936.
- [17] 龚裕仲, 江全元, 汪海蛟. 考虑电网频率偏差的风电功率爬坡限制指标动态优化 [J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2377-2384.
GONG Yuzhong, JIANG Quanyuan, WANG Haijiao. Dynamic optimization of wind power ramp limitation based on power system frequency deviation [J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2377-2384.
- [18] DELILLE G, FRANÇOIS 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.
- [19] KUNDUR P. Power system stability and control [M]. New York: McGrawHill, 1994: 595-596.
- [20] 陶骞, 贺颖, 潘杨, 等. 电力系统频率分布特征及改进一次调频控制策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 133-138.
TAO Qian, HE Ying, PAN Yang, et al. Characteristics of power system frequency abnormal distribution and improved primary frequency modulation control strategy [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 133-138.
- [21] 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. 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.
- [22] GONG Y, JIANG Q, BALDICK R. Ramp event forecast based wind power ramp control with energy storage system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 1831-1844.
- [23] ANDERSON P M, FOUAD A A. Power system control and stability [M]. Ames, Iowa: The Iowa State University Press, 1977.

收稿日期: 2018-07-12

作者简介:

樊海锋(1987) 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统运行与控制, 储能技术应用;

刘文龙(1991) 男, 博士研究生, 主要研究方向为新能源并网与储能技术应用;

苏大威(1972) 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电网调度及其自动化;

余璟(1980) 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网调度及其自动化。

(编辑 张小飞)