

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.03.005

电化学储能参与电网低频第三道防线的控制策略

孙诚斌¹, 李兆伟^{1,2}, 李碧君¹, 邹燕³, 周挺³, 薛峰¹

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

摘要:针对日益凸显的电网频率安全稳定问题,利用电化学储能的快速响应特性和功率双向调节能力,将其纳入到基于就地信号响应的频率安全第三道防线中,应对大功率缺额引起的低频问题。首先,分析电化学储能在低频第三道防线中的功能定位,基于单机带负荷等值模型,提出电化学储能参与频率安全第三道防线的频率响应模型;分析电化学储能分轮次动作的必要性和前提条件,提出临界容量及其计算方法。然后,研究电化学储能低频校正控制策略的制定方法,提出表征频率恢复效果和控制代价的综合指标,计及运行方式和故障场景,建立加权优化模型并整定电化学储能各轮次控制量。最后,实际电网的算例分析表明,所提出的校正控制策略具有较好的频率控制效果和适应性,有助于拓展电化学储能在电网中的应用场景。

关键词:电化学储能;低频第三道防线;校正控制;暂态频率安全;稳态频率

中图分类号: TM744

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)03-0027-08

0 引言

目前,电化学储能(下文简称“储能”)已经成为新能源大规模接入和特高压直流建设的重要技术支撑,在电力系统中得到了广泛应用^[1-4]。截至2020年6月底,我国储能的累计装机规模位列世界第二,为1 831.0 MW,同比增长53.9%^[5]。

电网中故障引起的大容量功率缺额会造成系统频率下降,甚至引发频率崩溃,不断增加的新能源发电占比和高电压大容量输电恶化了电网频率的安全稳定^[6]。低频减负荷是频率安全第三道防线的重要组成部分^[7],可以快速响应有序切除部分负荷,防止频率进一步跌落。2019年英国“8·9”事件即是低频减负荷正确动作防止全网频率稳定破坏的典型案列^[8]。但低频减负荷本身仍会造成大量用户失电,因此优化传统的频率校正控制策略,并将储能、直流等控制资源纳入其中,对提高电网应对极端严重故障的能力具有重要意义^[9-13]。

储能系统具有响应速度快、有功/无功协调双向控制、功率转换效率高等特点,可以在电网频率偏移时快速调节其输出功率,改善电力系统的动态频率特性。随着储能电池性能的优化和成本的降低,将储能纳入电网频率安全防御体系中也更加具有研究价值^[14-16]。文献[17]从频率安全角度出发,分析了储能在频率安全第三道防线里的作用及其容量配置的技术要点、储能技术未来的研究和应

用方向;文献[18]提出了切机和储能协调实施紧急控制的思路,减少切机量和储能充放电次数。但如何制定储能参与频率安全第三道防线的控制策略,包括储能动作的频率阈值、分轮次功率调整容量等,现有文献中鲜有提及。

文中针对电网低频安全稳定问题,阐述了储能在电网低频第三道防线中的功能定位,提出储能参与校正控制的频率响应模型,并以频率恢复效果和控制代价为综合指标,提出适应多运行方式和故障场景的储能低频校正控制策略,最后在实际电网中对该方案的控制效果和适应性进行仿真验证。

1 储能参与频率安全第三道防线的定位和频率响应模型

储能参与电网频率安全第三道防线是指在电网频率大幅偏移的情况下,储能电站(单元)根据检测到的频率信号,转换充放电状态或调节输出功率大小,避免系统频率崩溃,主要用于应对诸如多台发电机跳闸、多回直流闭锁、稳定控制系统拒动等电网安全稳定第三级标准故障^[19]。与低频提升直流、低频切泵等控制措施类似^[20],是对传统低频切负荷、低频解列等频率校正控制措施的进一步扩展。

对于电网中广泛分布的分散式储能,采用就地分散校正控制可以降低通信成本和控制难度,提高系统可靠性。在低频第三道防线中加入储能不能替代现有低频减负荷的配置,而是为了利用储能调节灵活的优势,减少低频减负荷的动作风险,逐步优化第三道防线的配置容量和控制效果。为了提

收稿日期:2020-12-08;修回日期:2021-01-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61933005)

高电网应对极端故障的能力,同时降低低频减负荷动作风险,应单独设置用于低频校正控制的储能动作轮次。考虑储能动作代价以及直流功率支援对异步互联电网的影响,储能低频动作顺序应在直流功率调制之前,优先于低频切泵、低频减负荷的基本轮首轮次动作,并根据电网特性和储能可用容量确定频率级差和动作延时。

分析储能参与第三道防线对频率响应的影响,基于单机带集中负荷模型,含储能的转子运动方程为:

$$2H_G \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_L + P_s \quad (1)$$

式中: H_G 为系统的惯性时间常数,定义为同步转速 ω_e 下发电机转子能量 $E_{MWS} = J\omega_r^2/2$ 与电机的额定容量 S_N 之比; P_m 为发电机组的机械功率; P_L 为负荷有功功率; P_s 为储能的输出有功功率。

如果考虑负荷的频率特性,参与系统频率的调节,并且忽略负荷功率随母线电压变化,则负荷模型可简化为静态有功功率模型,负荷的有功功率-频率特性可表示为:

$$\Delta P_L = K_L \Delta f \quad (2)$$

式中: ΔP_L 为负荷有功功率的变化量; Δf 为频率偏差; K_L 为负荷的静态频率调节效应系数。

发电机组通过原动机的调速系统实现频率的有差调节,忽略原动机的再热时间常数,并考虑调速器响应时间,可用一阶惯性环节来表示发电机的功频调节特性^[21]:

$$\Delta P_m = \Delta f K_G / (1 + T_G s) \quad (3)$$

式中: ΔP_m 为发电机的机械功率增量; K_G 为发电机的功频特性系数; T_G 为调速器时间常数; s 为拉普拉斯算子。该式用来衡量在一定的频率偏差下,发电机机械功率出力变化的动态过程。

对于复杂的多机系统,发电机惯性时间常数可用加权平均法等值^[22],如式(4)所示,调速器和负荷参数可基于遗传算法进行辨识等值^[21]。

$$H_G = \sum_{i=1}^n S_{Bi} H_{Gi} / \sum_{i=1}^n S_{Bi} \quad (4)$$

式中: S_{Bi} 为第 i 台发电机的容量; H_{Gi} 为第 i 台发电机的惯性时间常数; n 为发电机数量。

在大功率扰动故障下,对于常规火电机组,电网运行准则要求其在频率变化时至少具备 6% 额定容量的调节能力^[23]。由调速器模型可知,当系统频率偏差超过限值 Δf_m 时,调速器的输入信号将达到限幅,而系统功率扰动越大,调门指令达到限幅的时间越短,即在大扰动故障下,可将调门指令等效为阶跃信号。

不同于储能参与一次调频,在储能的快速校正控制中,可以省去变流器的外环控制,忽略动态调节过程,在频率达到动作阈值时,储能的输出功率可快速调至给定值 P_s ^[24]。忽略较小的时间常数和非线性部分,由此建立储能参与频率安全第三道防线的频率响应模型,具体如图 1 所示。

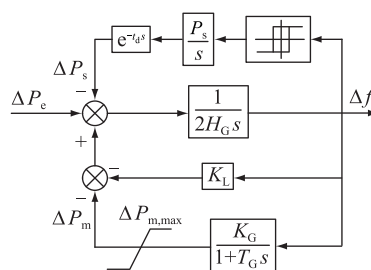


图 1 储能参与频率安全第三道防线的频率响应模型
Fig.1 Frequency response model of third defense lines containing energy storages

其中, ΔP_e 为系统的有功功率缺额,用阶跃响应表示,即 $\Delta P_e = P_e/s$ 。若频率达到启动阈值的时间为 t_e ,经过延时 t_d 后储能调节输出功率,即 $\Delta P_s = P_s e^{-t_z s}/s$, $t_z = t_e + t_d$ 。当 $\Delta f > \Delta f_m$ 时,调速器达到最大可调功率 $P_{m,max}$ 。由图 1 可得功率发生缺额后系统频率响应的频域表达式,当 $\Delta f < \Delta f_m$ 时,调速器未达最大可调功率,有:

$$\Delta f(s) = \frac{(1 + T_G s) \left(\frac{P_e}{s} - \frac{P_s}{s} e^{-t_z s} \right)}{2T_G H_G (s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (5)$$

其中:

$$\omega_n^2 = \frac{K_L + K_G}{2T_G H_G} \quad (6)$$

$$\xi = \frac{2H_G + T_G K_L}{2\sqrt{2T_G H_G (K_L + K_G)}} \quad (7)$$

当 $\Delta f > \Delta f_m$ 时,用于一次调频的旋转备用满发,有:

$$\Delta f(s) = \frac{\frac{P_e}{s} - \frac{P_{m,max}}{s(1 + T_G s)} - \frac{P_s}{s} e^{-t_z s}}{2H_G s + K_L} \quad (8)$$

经拉氏反变换可得频率时域表达式, $\Delta f < \Delta f_m$ 时,频率响应表示为:

$$\Delta f(t) = \frac{P_e}{K} [1 - e^{-at} (\cos bt + c \sin bt)] - \frac{P_s}{K} \{1 - e^{-a(t-t_z)} [\cos b(t-t_z) + c \sin b(t-t_z)]\} \times \varepsilon(t-t_z) + \frac{1}{2bH_G} [P_e e^{-at} \sin bt - P_s e^{-a(t-t_z)} \sin b(t-t_z) \varepsilon(t-t_z)] \quad (9)$$

其中:

$$a = \xi \omega_n \quad (10)$$

$$b = \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1} \quad (11)$$

$$c = \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 - 1}} \quad (12)$$

$$K = K_L + K_G \quad (13)$$

当 $\Delta f > \Delta f_m$ 时,频率响应表达式为:

$$\Delta f(t) = \frac{P_c}{K_L}(1 - e^{-dt}) - \frac{P_{m,\max}}{K_L} - \frac{P_s}{K_L}(1 - e^{-d(t-t_z)})\varepsilon(t - t_z) + \frac{P_{m,\max}}{2H_G d(1 - dT_G)}(e^{-dt} - dT_G e^{-\frac{t}{T_G}}) \quad (14)$$

其中:

$$d = \frac{K_L}{2H_G} \quad (15)$$

稳态频率偏差表示暂态过程结束后频率的恢复程度,由式(9)和式(14)可得稳态频率偏差表达式为:

$$\begin{cases} \Delta f_s = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta f(t) = \frac{P_c - P_s}{K_L + K_G} & \Delta f < \Delta f_m \\ \Delta f_s = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta f(t) = \frac{P_c - P_s - P_{m,\max}}{K_L} & \Delta f > \Delta f_m \end{cases} \quad (16)$$

储能系统在运行时,一般要考虑储能相关约束的限制。由于校正控制暂态时间尺度短,荷电状态几乎不变,因此在上述频率响应模型中可不考虑储能容量的约束。频率安全第三道防线需要能够应对电网中的各种不确定运行状态和随机扰动故障,并且其控制量无法精确统计,因此不考虑故障发生之前储能的充放电状态。考虑电网中所有储能全部参与校正控制,各轮次动作量按储能额定总容量的百分比进行调节(即控制量),减小储能运行状态对每轮次动作量的影响。

2 储能参与低频第三道防线的控制策略

储能参与低频校正控制的分轮次控制策略中,需要整定的参数主要包括:储能各轮次启动的频率阈值 $f_{e,k}$,各轮次功率的控制量和各轮次的动作延时 $t_{d,k}$ 。综合考虑电网正常频率的运行范围及一次调频的运行要求,储能第一轮的动作阈值不宜高于 49.5 Hz。当参与第三道防线的储能容量充足,需要设置多个储能低频动作轮次时,各轮次之间的频率级差可以按 0.1~0.2 Hz 确定,储能最终轮与低频减负荷第一轮频率级差可以按 0.1~0.2 Hz 考虑。

在实际工程应用中,各轮次的动作延时需要兼顾装置动作防误和频率控制效果两方面,一般设置为 200~300 ms,可调整空间不大。

2.1 储能分轮次动作的临界容量

当储能参与第三道防线的频率动作阈值确定之后,即可整定每轮次的功率增量 $\Delta P_{s,k}$ 。假设发生导致储能第 k 轮次动作的最小功率扰动为 $\Delta P_{e,k}^m$,导致该轮次动作的最大功率扰动为 $\Delta P_{e,k}^n$,该轮动作后的目标恢复频率为 f_{sa} 。将目标恢复频率设定在一定范围之内,保证频率的校正控制效果。为了充分发挥旋转备用的调节作用, f_{sa} 的设定可以和 Δf_m 相配合,并且设定上限防止频率恢复过程中暂态频率过高造成额外的安全风险。

在发生大功率缺额扰动时,由式(16)可知,若第 k 轮不动作,则频率偏差达到 $\Delta f_{e,k}$ 对应的功率缺额为:

$$\begin{cases} \Delta P_{e,k} = \Delta f_{e,k} K - \sum_i^{k-1} \Delta P_{s,i} & \Delta f < \Delta f_m \\ \Delta P_{e,k} = \Delta f_{e,k} K_L + P_{m,\max} - \sum_i^{k-1} \Delta P_{s,i} & \Delta f > \Delta f_m \end{cases} \quad (17)$$

将频率由 $f_{e,k}$ 恢复到 f_{sa} 的第 k 轮储能功率增量为:

$$\begin{cases} \Delta P_{s,k} = (f_{sa} - f_{e,k}) K & \Delta f < \Delta f_m \\ \Delta P_{s,k} = f_{sa} K - f_{e,k} K_L - K_G - P_{m,\max} & \Delta f > \Delta f_m \end{cases} \quad (18)$$

目前储能在电网中的容量占比还相对较小,当达到储能低频动作阈值时,储能可快速投入最大功率,快速提供频率支撑。如果可用于校正控制的储能配置容量较大,则这种粗犷的控制策略可能造成电网发电功率过剩,导致频率高于正常水平,进而引发过频切机或新能源机组脱网等连锁事故。

由于电网运行方式具有复杂性和多变性,无法对所有的运行方式进行逐一计算,为了减少工作量,选取若干种典型的运行方式,如夏大、夏小、冬大、冬小等。通过对历年电网数据的分析,统计出电网各种运行方式累计运行时间、出现故障的类型及次数,得出概率分布情况,选取具有代表性的典型运行方式集 C ;在此基础上进行电网安全稳定分析,在安全稳定第三级标准故障中得出可能引起大功率缺额的大扰动故障集 F 。

根据式(17)和式(18),结合典型运行方式集 C 和扰动故障集 F ,筛选出造成功率缺额最小的运行方式和对应的扰动故障,代入频率响应模型,计算出满足电网频率过调约束的储能放电功率,其最大

值即为储能分轮次参与低频安全第三道防线的临界容量 $P_{s,b}$ 。当系统中可用于第三道防线的储能容量高于该值时,必须进行分轮次动作。

2.2 储能参与低频第三道防线的控制策略

在安排储能参与校正控制的策略时,根据电网的频率响应特性和已有的频率校正控制措施,整定频率阈值、延时和放电功率控制量。其中,储能低频动作的各轮次频率阈值应设定为不低于低频减负荷的首轮频率门槛值,使储能以更高的优先级参与到电网低频安全第三道防线中。若低频减负荷基本轮或特殊轮的频率作用范围和储能存在动作重合区,则必须考虑两者的协调:延时较短和控制代价较低的储能优先动作防止频率进一步降低,低频减负荷特殊轮动作防止频率在较低水平长时间悬浮;当储能全部轮次动作仍无法解决低频问题时,则由低频减负荷继续提供频率支撑。

确定了储能的频率阈值和延时后,对各轮次控制量进行整定和优化计算。储能的放电功率值逐轮次递增,各动作轮次整定量互相影响,决定了有功功率的支撑能力和频率的恢复效果。因此,为了制定控制效果最优的储能校正策略,必须综合考虑电网的运行方式、系统的功率不平衡量和各轮次动作量的情况,以储能轮次动作后的频率指标和控制代价为综合指标进行优化,确定在相关约束条件下各轮次储能的最优功率增量。由 n 个轮次储能功率增量表示的优化变量 X 为:

$$X = [\Delta P_{ds,1}, \Delta P_{ds,2}, \dots, \Delta P_{ds,n}] \quad (19)$$

表征频率恢复效果和控制代价的综合指标为:

$$F(X)^{i,j} = C_{ls} \sum_{h=1}^{N_1} P_{ls,h}^{i,j} + C_{es} \sum_{k=1}^{N_2} \Delta P_{ds,k} + C_{fs} |\Delta f_s^{i,j}| + C_{fp} |\Delta f_p^{i,j}| + C_{fd} |\Delta f_d^{i,j}| \quad (20)$$

式中:当在运行方式 $i(i \in C)$ 下发生扰动故障 $j(j \in F)$ 时, $\Delta f_p^{i,j}$ 为暂态过程中频率跌至最低值时的频率偏差, $\Delta f_d^{i,j}$ 为暂态频率最高值时的频率偏差,可由式(9)和式(14)求得;稳态频率偏差 $\Delta f_s^{i,j}$ 可由式(16)求得; C_{ls} , C_{es} , C_{fs} , C_{fp} , C_{fd} 分别为切负荷代价系数、储能代价系数、稳态频率指标系数、最低频率指标系数和最高频率指标系数; $P_{ls,h}^{i,j}$ 为第 h 轮切负荷量; $\Delta P_{ds,k}$ 为第 j 轮储能输出功率增量; N_1, N_2 分别为低频减负荷和储能的低频动作轮数。

以上各系数的选取原则及其量纲的统一方法为:切负荷的控制代价要高于储能的控制代价,最低和最高频率指标的权重要高于稳态频率的权重;控制代价用各运行方式下储能动作量或切负荷量占额定储能容量或负荷功率的相对值表示(即控制

量),频率指标用标么值表示,以统一不同运行方式下的量纲。

构建考虑各种故障场景和运行方式的加权优化目标函数:

$$\min \left\{ \lambda_i \sum_i \left[\mu_j \sum_j F(X)^{i,j} \right] \right\} \quad (21)$$

式中: λ_i 为运行在方式 i 下的概率, μ_j 为发生故障 j 的概率,均可根据历史数据统计得到; N_c 为典型运行方式数; N_d 为故障场景数。

综合储能的功率控制能力、电网频率、联络线功率的约束条件设定如下:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^n \Delta P_{s,k} \leq P_{s,max} \\ \Delta f_d^{i,j} \leq \Delta f_{d,max} \\ \Delta f_p^{i,j} \leq \Delta f_{p,max} \\ \Delta f_{s,min} \leq \Delta f_s^{i,j} \leq \Delta f_{s,max} \\ S_{sec} \leq S_{sec,max} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{s,max}$ 为储能系统最大放电功率值;最高和最低暂态频率的偏差值和也要满足一定约束,分别不能高于 $\Delta f_{d,max}$ 和 $\Delta f_{p,max}$,防止频率大幅度波动,避免一系列连锁故障^[6];为了保障恢复效果,必须要求稳态频率在合理范围之内, $\Delta f_{s,min}$ 和 $\Delta f_{s,max}$ 分别为稳态频率最小和最大值的偏差约束;同时, S_{sec} 为断面的潮流约束,要满足联络线的最大送电能力 $S_{sec,max}$ 的约束。

结合式(19)一式(22)的目标函数和约束条件,求解出最优储能放电功率增量 $\Delta P_{ds,k}$,并折算为占总装机容量 $P_{s,N}$ 的比值 $\Delta I_{s,k}$,得到各轮次储能的控制量:

$$\Delta I_{s,k} = \frac{\Delta P_{ds,k}}{P_{s,N}} \quad (23)$$

综上,储能参与低频第三道防线控制方案的制定流程如图2所示。准备策略制定所需的数据,在典型运行方式集 C 和引起大功率缺额的大扰动故障集 F 下,建立计及储能参与频率安全第三道防线的频率响应模型,安排储能的动作轮数、各轮次启动的频率阈值和动作延时,优化储能各轮次控制量,得到储能低频校正控制方案,并校核校正控制动作后系统潮流的合理性。

3 华东电网算例分析

在华东电网2个典型运行方式下进行仿真分析。华东电网的直流馈入示意如图3所示。

方式I总负荷功率为154GW,总直流馈入功率

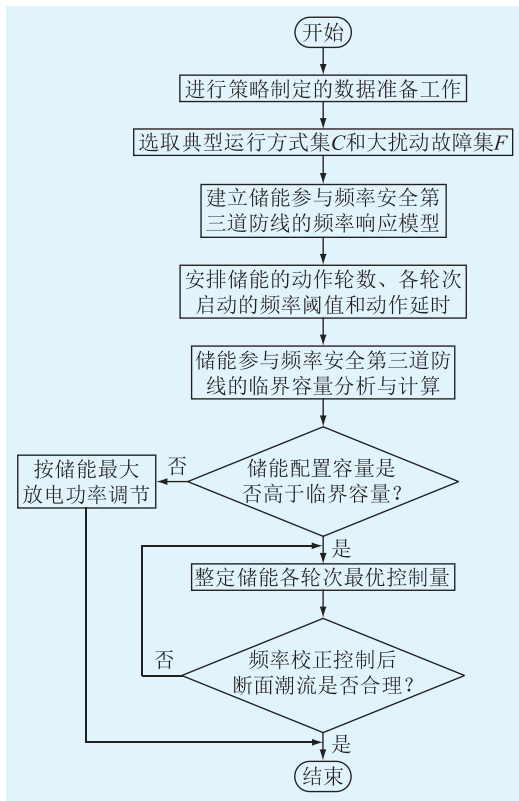


图2 最优控制方案的制定流程

Fig.2 Tuning flowchart of the optimal control scheme

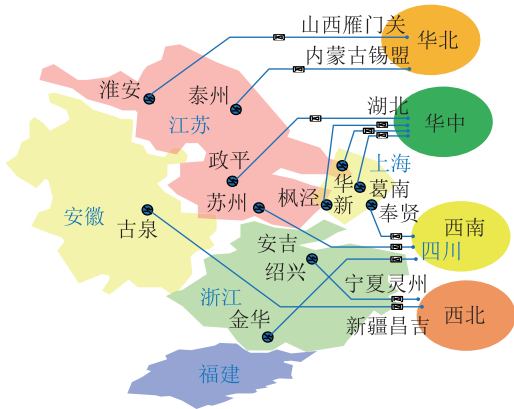


图3 华东电网直流馈入示意

Fig.3 Schematic diagram of DC feed-in for East China Power Grid

为 48.6 GW。方式 II 总负荷功率为 353 GW,总直流馈入功率为 73 GW。低频减负荷的配置方案为:3 轮基本轮和 1 轮特殊轮,在频率跌至 49.0 Hz,48.75 Hz,48.5 Hz 时分别切除负荷 3.5%,4%和 5.3%,并且频率低于 49.0 Hz 达到 15 s 以上时切除 3%的负荷;2 种方式下均配置了可用于校正控制的分散式储能,总计 22.5 GW。典型故障场景由各直流的单/双极闭锁故障组成。经计算,方式 I 和方式 II 的临界储能容量分别为 9.93 GW 和 14.4 GW。制定 3 种控制方案,其中方案 1 为储能不参与频率校正控制,

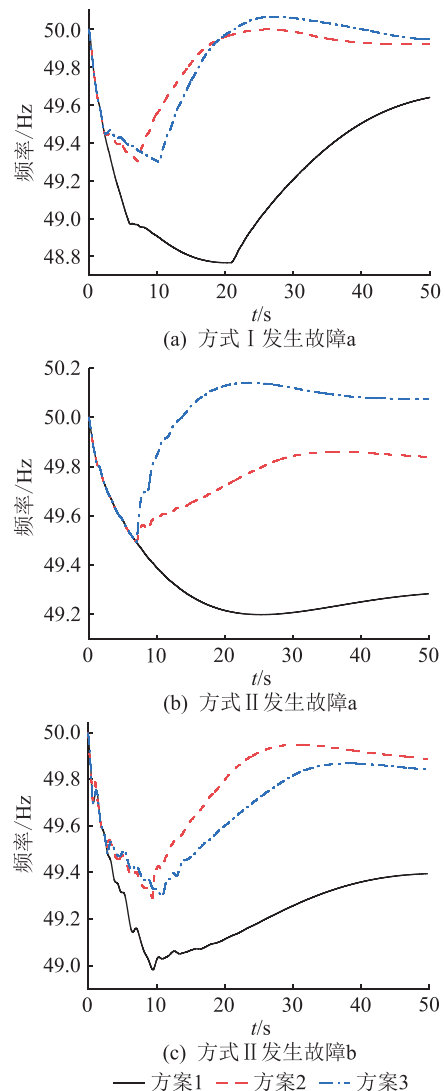
结合电网频率特性,将储能轮次安排为 3 轮;方案 2 为按照文中方法得到的储能 3 个轮次控制方案;方案 3 为储能功率平均分配到 3 个轮次的控制方案,如表 1 所示。

表 1 储能参与低频第三道防线方案

Table 1 Control schemes of third defense lines for low frequency containing energy storages

轮次	频率阈 值/Hz	延时 /s	方案 2		方案 3	
			$\Delta P_{ds,k}/\text{GW}$	$\Delta I_k/\%$	$\Delta P_{ds,k}/\text{GW}$	$\Delta I_k/\%$
1	49.5	0.2	6.618 4	29.42	7.5	33.3
2	49.3	0.2	7.466 5	33.18	7.5	33.3
3	49.2	0.2	8.415 1	37.40	7.5	33.3
合计			22.5	100	22.5	100

图 4 为 2 种运行方式下分别在 0 s 发生大功率缺额扰动 a 和 b 时,3 个频率校正控制方案的频率响应曲线。

图 4 不同控制方案下的频率曲线对比
Fig.4 Comparison of frequency curves under different control schemes

其中,方式 I 下发生故障 a(锦苏、宾金直流双极闭锁,龙政直流单极闭锁),共造成功率缺额 15.95 GW;方式 II 下发生故障 a,共造成功率缺额 16.7 GW;方式 II 下发生故障 b(锦苏、宾金、复奉直流双极闭锁,雁淮直流单极闭锁),共造成功率缺额 25.6 GW。可以看出,方案 1 中储能不参与控制,触发低频减负荷动作,或使频率悬浮于较低水平。而方案 2 和方案 3 均可以将频率恢复至额定值附近。

表 2 给出 3 种情况下不同控制方案的动作量、频率指标和综合指标。可以看出,方案 2 具有相较于其他方案更优的综合指标。方案 1 易触发低频减负荷动作,控制代价较大,且控制效果不佳,而方案 3 虽然可以避免切负荷,但在部分方式下会产生较大的频率过调,影响控制效果。因此,在结构较复杂和元件模型较多样的实际电网中,所述方法可以制定出较优的储能校正控制策略,解决各种运行方式下发生大功率缺额扰动后的低频问题,具有实际应用价值。

表 2 控制量和频率指标的比较

Table 2 Comparison of control quantity and frequency index

(a) 方式 I 发生故障 a

方案	控制量/GW		频率指标/Hz			综合 代价
	储能(轮数)	切负荷	f_s	f_p	f_d	
1	0	9.262	49.67	48.77	50.00	1.867
2	14.084 9(2)	0	49.93	49.23	50.00	1.467
3	15(2)	0	49.95	49.30	50.07	1.489

(b) 方式 II 发生故障 a

方案	控制量/GW		频率指标/Hz			综合 代价
	储能(轮数)	切负荷	f_s	f_p	f_d	
1	0	0	49.28	49.20	50.00	1.519
2	6.618 4(1)	0	49.84	49.49	50.00	0.923
3	7.5(1)	0	50.08	49.49	50.14	1.060

(c) 方式 II 发生故障 b

方案	控制量/GW		频率指标/Hz			综合 代价
	储能(轮数)	切负荷	f_s	f_p	f_d	
1	0	10.849	49.39	48.98	50.00	1.777
2	14.084 9(2)	0	49.89	49.29	50.00	1.445
3	15(2)	0	49.84	49.30	50.00	1.522

4 结语

新能源发电的快速发展和特高压直流的建设支撑了国家的能源转型战略实施,但也给电网的频率安全稳定控制带来了新的挑战。储能作为可以快速响应的有功控制资源,有利于提高电网的频率

稳定水平,文中将其应用到低频第三道防线中,有如下结论:

(1) 分析了储能参与低频第三道防线的定位,将储能用于频率校正控制,可以充分利用储能的优势,既有利于电网的频率安全,也有助于提高储能的多重化利用效益。

(2) 考虑机组一次调频特性及负荷频率特性,建立了储能参与频率安全第三道防线的频率响应模型,有助于提高制定储能校正控制策略的工作效率。

(3) 提出了储能参与低频第三道防线的控制策略制定方法,综合考虑稳态频率、暂态频率以及控制代价,在保障频率安全的同时,降低低频减负荷动作风险。

将储能纳入到频率安全第三道防线依赖于储能的容量规模和运行状态,综合考虑储能多方面约束、协调储能在各种层面的控制,以及考虑频率安全风险的储能运行优化都有待进一步研究。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“大容量储能支撑机网安全稳定运行关键技术研究”(J2019027)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] BULLICH-MASSAGU E, CIFUENTES-GARC A F J, GLENNY-CRENDE I, et al. A review of energy storage technologies for large scale photovoltaic power plants [J]. Applied Energy, 2020, 274: 115213.

[2] KOOHI-FAYEGH S, ROSEN M A. A review of energy storage types, applications and recent developments [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101047.

[3] 李建林, 田立亭, 来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 15-25.

LI Jianlin, TIAN Liting, LAI Xiaokang. Outlook of electrical energy storage technologies under energy Internet background [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 15-25.

[4] 许守平, 李相俊, 惠东. 大规模储能系统发展现状 & 示范应用 [J]. 电源技术, 2015, 39(1): 217-220.

XU Shouping, LI Xiangjun, HUI Dong. Survey of development and demonstration application of large-scale energy storage [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(1): 217-220.

[5] 全球储能市场跟踪报告(2020.Q2) [R]. 北京: CNESA. 2020. Tracking report of global energy storage market (2020.Q2) [R]. Beijing: CNESA. 2020.

[6] 李兆伟, 吴雪莲, 庄侃沁, 等. “9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 149-155.

LI Zhaowei, WU Xuelian, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of East China grid after bipolar locking of ‘9·19’ Jinping-Sunan DC transmission line

- [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 149-155.
- [7] 电力系统自动低频减负荷技术规定:DL/T 428—2010[S]. 北京:中国电力出版社,2011.
Technical rules for power system automatic under-frequency load shedding: DL/T 428—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [8] 陈兴华,李峰,陈睿,等. 计及安全稳定二、三道防线的电网运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 159-166.
CHEN Xinghua, LI Feng, CHEN Rui, et al. Risk assessment of power grid operation considering second and third defense line of security and stability[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 159-166.
- [9] 方勇杰. 英国“8·9”停电事故对频率稳定控制技术的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 1-5.
FANG Yongjie. Reflections on frequency stability control technology based on the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 1-5.
- [10] 王怀远,何培灿,江岳文,等. 基于估测惯量计算的低频减载方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 51-56, 63.
WANG Huaiyuan, HE Peican, JIANG Yuewen, et al. Under-frequency load shedding scheme based on estimated inertia[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 51-56, 63.
- [11] 孙毅,李泽坤,黄绍模,等. 基于分布式需求侧资源备调池的低频减载优化策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 1016-1026.
SUN Yi, LI Zekun, HUANG Shaomo, et al. An improved UFLS strategy based on distributed demand side resource pools[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 1016-1026.
- [12] 李碧君,黄志龙,刘福锁,等. 直流紧急功率支援用于第三道防线的研究[J]. 中国电力, 2016, 49(6): 72-77.
LI Bijun, HUANG Zhilong, LIU Fusuo, et al. A study on the emergency DC power support as the third defense of the power system[J]. Electric Power, 2016, 49(6): 72-77.
- [13] 鲍珣珣. 含抽水蓄能电站的电网负荷频率控制系统研究[D]. 上海:上海交通大学, 2015.
BAO Xunxun. Research on power grid load frequency control system with pumped storage power station[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [14] 李琳,周霞,罗剑波,等. 适用于频率安全稳定的低频切泵及减载协调优化方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 26-31.
LI Lin, ZHOU Xia, LUO Jianbo, et al. A coordination and optimization method for under frequency load shedding and pump shedding suiting frequency safety and stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 26-31.
- [15] 曾辉,孙峰,邵宝珠,等. 澳大利亚 100 MW 储能运行分析及对中国的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 86-92.
ZENG Hui, SUN Feng, SHAO Baozhu, et al. Analysis of Australian 100 MW energy storage operation and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 86-92.
- [16] 孙冰莹,杨水丽,刘宗歧,等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 8-16, 38.
SUN Bingying, YANG Shuili, LIU Zongqi, et al. Analysis on present application of megawatt-scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16, 38.
- [17] 李建林,牛萌,王上行,等. 江苏电网侧百兆瓦级电池储能电站运行与控制分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 28-35.
LI Jianlin, NIU Meng, WANG Shangxing, et al. Operation and control analysis of 100 MW class battery energy storage station on grid side in Jiangsu power grid of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 28-35.
- [18] 李兆伟,方勇杰,李威,等. 电化学储能应用于电网频率安全防御三道防线的探讨[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 1-7.
LI Zhaowei, FANG Yongjie, LI Wei, et al. Discussion on application of electrochemical energy storage in three defense lines of power grid frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 1-7.
- [19] 韦肖燕,李欣然,钱军,等. 采用储能电源辅助的暂态稳定紧急控制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 286-300.
WEI Xiaoyan, LI Xinran, QIAN Jun, et al. Power system transient stability emergency control method assisted by energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 286-300.
- [20] 电力系统安全稳定导则:GB/T 38755—2019[S]. 2019.
Guide on security and stability for power system: GB/T 38755—2019[S]. 2019.
- [21] 许涛,吴雪莲,李兆伟,等. 改善系统频率稳定性的多直流功率紧急支援协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 69-77, 143.
XU Tao, WU Xuelian, LI Zhaowei, et al. Coordinated control strategy of multi-DC emergency power support to improve frequency stability of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 69-77, 143.
- [22] 李东辉,臧晓明,鞠平,等. 电力系统频率响应的改进模型与参数估计[J]. 电力工程技术, 2019, 38(5): 85-90.
LI Donghui, ZANG Xiaoming, JU Ping, et al. The improved model and parameter estimation for frequency response of power system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 85-90.
- [23] 章帆帆,刘涤尘,梁姗姗,等. 考虑励磁和调速器系统的水电机群等值建模[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(2): 245-250.
ZHANG Yangfan, LIU Dichen, LIANG Shanshan, et al. An equivalent modeling for hydropower generator group considering excitation and governor system[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(2): 245-250.

[24] 李常刚,张恒旭,刘玉田,等. 考虑机组低频保护的电力系统暂态频率稳定评估[J]. 电工技术学报,2013,28(2):271-278.

LI Changgang,ZHANG Hengxu,LIU Yutian,et al. Power system transient frequency stability assessment considering unit underfrequency relay protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(2):271-278.

[25] 李妍,荆盼盼,王丽,等. 通用储能系统数学模型及其PSASP建模研究[J]. 电网技术,2012,36(1):51-57.

LI Yan,JING Panpan,WANG Li,et al. A mathematical model of versatile energy storage system and its modeling by power

system analysis software package[J]. Power System Technology,2012,36(1):51-57.

作者简介:



孙诚斌

孙诚斌(1996),男,硕士在读,研究方向为电力系统安全稳定分析与控制(E-mail:sun_chengbin@qq.com);

李兆伟(1985),男,硕士,高级工程师,从事电力系统安全稳定分析与控制工作;

李碧君(1966),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统安全稳定分析与控制工作。

A control strategy for the low frequency third defense line of power grid containing the electrochemical energy storage

SUN Chengbin¹, LI Zhaowei^{1,2}, LI Bijun¹,ZHOU Yan³, ZHOU Ting³, XUE Feng¹

(1. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co.,Ltd.,Nanjing 211106,China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering,North China Electric Power University,

Beijing 102206,China;3. State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd.,Nanjing 210024,China)

Abstract:In response to the increasingly prominent problem of frequency security and stability of the power grid,the rapid response characteristics and the ability of two-way power adjustment of electrochemical energy storage are incorporated into the third defense line for frequency security based on on-site signal response to deal with low frequency caused by high power shortage. Firstly,the functional positioning of electrochemical energy storage in the third defense line for low frequency security is analyzed. A frequency response model of the third defense line for frequency security contained electrochemical energy storage is proposed based on the equivalent model of a single machine with load. The necessity and prerequisites of sub-round actions of electrochemical energy storage are analyzed. And a calculation method for the critical capacity of sub-round actions is proposed. Furthermore,the formulation method of the corrective control strategy is studied. The frequency recovery effect and control cost are used as comprehensive indicators. A weighted optimization model is formed to tune the control volume of each round,considering the operation mode and failure scenarios. Finally,it is verified by the actual power grid analysis that the proposed corrective control strategy has better frequency control effect and adaptability,which is helpful to expand the application scenarios of electrochemical energy storage in the power grid.

Keywords:electrochemical energy storage; low frequency third defense line; corrective control; transient frequency safety; steady-state frequency

(编辑 方晶)