

# 电池储能提高电力系统调频性能研究

张彩宏

(山西龙源新能源有限公司, 山西 太原 030006)

**摘要:** 探究储能技术在大比例可再生能源电力系统应用中的调频价值, 并据此确定相同功耗功率的储能技术作用于系统的调频效果, 量化储能调频作用于电力系统中的功率及能量数值, 解决当前遇到的难点问题。基于此, 本文结合电网应用的实际案例以及定量指标, 探究电池储能系统的多时间尺度在不同扰动情况下的替代水平, 以此判断电池储能在电机组的高替代中的实际表现。

**关键词:** 电池储能; 火电机组; 电力系统; 调频

**中图分类号:** TM73

**DOI:** 10.12230/j.issn.2095-6657.2022.18.015

**文献标识码:** A

当前, 为了实现可持续发展和减少温室气体对于全球气候的影响, 我国积极响应国家号召逐渐提升可再生能源的比重, 特别可再生能源发电方面, 但较高占比的可再生能源在实际应用中存在着一些较为显著的问题, 尤其是当前处于起步与加速阶段的大环境下, 能源类型的改变将会对电网系统频率的稳定性、安全性带来一定的影响。为了能够有效减少频率安全问题的发生, 需要具有有效的调频资源作为保障, 因此, 通过采用调频资源代替火电机组对于电网的调频能力成为研究的重点方向<sup>[1]</sup>。

## 1 储能调频诠释

### 1.1 储能调频模拟

电池储能在系统中实现调频主要依靠变流器控制技术, 通过模拟同步电机的特性以实现频率的支援控制, 此过程可分为两个方面:

#### (1) DC/AC 转换器

DC/AC 转换器分为内环控制(内环电流解耦控制)以及外环控制(固定增量控制、变化增量控制、下垂控制和综合惯性控制)。可有效控制储能频率偏差的方式为有功功率—下垂控制, 其中有功功率的增量  $\Delta P_B(t)$  可以表示为:

$$\Delta P_B(t) = -\frac{1}{R_B} \Delta f(t) \quad (1)$$

式中:  $R_B$  表示储能调查系数;

$\Delta f(t)$  表示 t 时间上系统中频率的偏差。

#### (2) 系统中运行状态的控制

电池储能进行电力系统的频率调整运行时能够实现参数的自行调整, 并且在这个过程中调频频率的范围是全功率调节状态 ( $-P_{\max} \sim P_{\max}$ ), 因此, 由公式 (1) 可得:

$$\Delta P_B = \min \left( P_{\max}, -\frac{1}{R_B} \Delta f \right) \quad (2)$$

式中:  $P_{\max}$  表示储能最高调频功率。

考虑到受到运行寿命的限制, 储能在进行调频过程中功率的输出将会受到电池荷电状态的影响, 其中当处于小波动频率时, 储能的电池荷电状态浮动范围为  $S_{\text{low}} \sim S_{\text{high}}$  (设定幅度为 40% ~ 60%) 时将会获得最大的运行寿命; 当系统中存在较大的波动时, 为了获得最佳系统稳定性, 应允许电池储能可进行

深度充放, 即储能的电池荷电状态浮动范围应为  $S_{\min} \sim S_{\max}$  (设定幅度为 10% ~ 90%); 当储能的电池荷电状态超出范围时表示储能处于充满或者放空的状态, 系统将会自动停止运行, 而储能系统中吸收或释放出的功率则由频率变化率以及频率偏差所控制<sup>[2]</sup>。

#### (3) 储能等效模拟

储能的控制是由运行控制以及变流器控制所构成, 其等效模拟可以表示为:

$$P_B(s) = P_B^*(s) + \Delta P_B(s) = P_B^*(s) + \frac{1}{(1+sT_B)R_B} \Delta f(s) \quad (3)$$

$$S = S^* + \Delta S = S^* + \begin{cases} \int P_B \Delta t dt & |\Delta f| > \Delta f_{\text{set}}, R_{\text{ocof}} > R_{\text{ocof}}^{\text{set}} \\ 0 & |\Delta f| \leq \Delta f_{\text{set}}, R_{\text{ocof}} \leq R_{\text{ocof}}^{\text{set}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_B$  表示储能进行充放工作时的功率;

$P_B^*$  表示储能在初始状态下的功率;

$T_B$  表示储能在响应状态下的时间常数;

$S^*$  表示储能初始状态下的电池荷电状态;

$\Delta S$  表示储能电池荷电状态的变化参数;  $\Delta f_{\text{set}}$  表示系统中频率偏差的设定参数;

$R_{\text{ocof}}$  表示储能的频率变化率。

### 1.2 储能调频存在的固有优势分析

#### (1) 提升频率的响应动态

为了明确储能快速响应的优势, 可采用稳定判断方法对储能以及火电机组进行验证, 其中火电机组频率调整的传递函数为:

$$G(s) = \frac{1}{Ms + D} \frac{1}{R_G} G_G(s) = \frac{1 + sF_{\text{HP}}T_{\text{RH}}}{(Ms + D)(1 + sT_G)(1 + sT_{\text{CH}})(1 + sT_{\text{RH}})} \cdot \frac{1}{R_G} = \frac{(1 + sF_{\text{HP}}T_{\text{RH}})}{As^4 + Bs^3 + Xs^2 + Ys + D} \frac{1}{R_G} \quad (5)$$

公式 (5) 中 A、B、X、Y 分别表示为:

$$\begin{cases} A = MT_G T_{\text{RH}} T_{\text{RH}} \\ B = DT_G T_{\text{CH}} T_{\text{RH}} + M(T_G T_{\text{CH}} + T_{\text{CH}} T_{\text{RH}} + T_G T_{\text{RH}}) \\ X = D(T_G T_{\text{CH}} + T_{\text{CH}} T_{\text{RH}} + T_G T_{\text{RH}}) + M(T_G + T_{\text{CH}} + T_{\text{RH}}) \\ Y = M + D(T_G + T_{\text{CH}} + T_{\text{RH}}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: M 表示为 2 倍的系统惯性时间常数;

D 表示系统中存在的阻尼系数；  
 $G_G(s)$  表示火电机组频率调整的传递函数；  
 $T_C$  表示火电机组在系统调频中的时间常数；  
 $R_C$  表示火电机组的  $\delta$  值；  
 $T_{CH}$  表示汽轮机在系统调频中的时间常数；  
 $T_{RH}$  表示再热器在系统调频中的时间常数；  
 $F_{HP}$  表示再热器收得到的增益量。  
 储能参与的频率调整的传递函数为：

$$G(s) = \frac{1}{(Ms+D)(1+sT_B)R_B} = \frac{1}{T_B Ms^2 + (M+DT_B)s + D R_B} \quad (7)$$

将储能以及火电机组中的  $\delta$  作为模拟参数的变量，解析不同  $\delta$  下对于频率调整稳定性的作用：在储能频率调整中系统处于过度阻尼状态，而火电机组频率调整中系统处于欠阻尼状态，此时随着储能  $\delta$  的不断变小，调频的稳定性将会不断增强，而在火电机组中  $\delta$  不断变小反而会会引起较大程度的  $\delta$  波动，从而造成系统的失稳<sup>[3]</sup>。

### (2) 储能调频水平分析

在各项参数相同的系统中针对储能以及火电机组进行同负荷扰动条件的有功功率调频输入，其中不同型号机组在电力系统中的频率调整对于储能调频的优势为：

$$\phi_{power}(t) = \frac{\Delta P_B(t) P_G^{max}}{P_B^{max} \Delta P_G(t)} \quad (8)$$

$$\phi_{energy}(t) = \frac{\Delta E_B(t)}{\Delta E_G(t)} = \frac{\int_0^t \Delta P_B P_G^{max} dt}{\int_0^t P_B^{max} \Delta P_G dt} \quad (9)$$

式中： $\phi_{power}(t)$  表示 t 时间中系统调频功率代替水平的评价指标；

$\phi_{energy}(t)$  表示初始至 t 时间中系统调频能量替代水平的评价指标；

$\Delta P_C(t)$  表示火电机组在 t 时间中参与电网的功率大小；

$P_B^{max}$  表示新加入储能的输出功率峰值；

$P_C^{max}$  表示新加入火电机组的输出功率峰值；

$\Delta E_B(t)$  表示初始至 t 时间中储能参与到电网的电量大小；

$\Delta E_C(t)$  表示表示初始至 t 时间中火电机组参与到电网的电量大小。

通过解析上述公式可以看出，当电力系统中频率处于改变的初期阶段时，储能调频产生的能量高于火电机组，并具有显著的代替水平，但系统在运行一段时间后，系统趋于平静，这时储能与火电机组所产生的能量将呈现为固定数值状态，而储能相对于火电机组的代替水平也将呈现为固定数值。

## 2 储能调频作用于电力系统时所产生的影响以及量化标准

### 2.1 储能调频对高新能源渗透率系统参数的影响

由前文分析可知，电力系统中  $\delta$  与增益效果成反比，在实际工作程中，汽轮机组的  $\delta$  通常为 4%~5%、水轮机组  $\delta$  通常为 2%~4%，而储能的  $\delta$  则可根据需求进行设定。对于具有多个同类型调频资源的系统，可将相同调频资源视为单一机组，其等值  $\delta R_i$  可以表示为：

$$\frac{1}{R_i} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i,i}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i,i}^*} \frac{\gamma S_{i,i}}{f_N} \quad (10)$$

$$\frac{1}{R_i^*} = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{i,i}^*} \gamma S_{i,i}}{\sum_{i=1}^n \gamma S_{i,i}} \quad (11)$$

式中： $R_{ii}$  表示 t 类型的第 i 台机组的  $\delta$ ；

$R_{ii}^*$  表示 t 类型的第 i 台机组的  $\delta$  标么值；

$S_{ii}$  表示 t 类型的第 i 台机组的装机容量大小；

$\gamma \in (0, 1)$  表示系统中并网机组在整体设备中的占比；

$f_N$  表示机组的额定频率；

$R_i^*$  表示等值  $\delta$  的标么值。

在新能源占比增加的情况下，整个系统中  $\delta$  的标么值将呈现增加状态，但这种情况将导致调频效果降低。本研究中采用新能源占比为 20% 的电力系统为例，分析在增加不同功率储能以及火电机组下电力系统的  $1/R_i^*$  的变化状态。在等效条件下储能所获取的  $1/R_i^*$  增效优于火电机组，在  $\Delta S_i$  对系统  $\Delta f$  的影响中可以看出，在 0.04p.u. 阶跃干扰下增加储能和火电机组具有最高的频率偏差变化幅度，并且就运行中频率最低点获得的提升效果而言，储能显著高于火电机组，储能新增功率仅需要运行机组的 2% 便能够使其频率达到稳定范围的状态<sup>[4]</sup>。

### 2.2 储能最大频率偏差替代指标

电力系统中频率的最大频率偏差是衡量整个系统中调频能力的主要指标。相同频率最低点状态下，可采用不同调频资源装机容量的比  $\rho$  评价各工况下的调频能力，使用公式可以表示为：

$$\rho = \frac{\Delta E_{G,nadir}}{\Delta E_{B,nadir}} \quad (12)$$

式中： $\Delta E_{G,nadir}$  表示能够使系统达到频率最低点的新增火电机组容量；

$\Delta E_{B,nadir}$  表示能够使系统达到频率最低点的新增容量。

设定新能源产生电力由 0% 至 45%，据此设定对应的系统负荷、装机容量以及扰动数值，从而构建不同调频资源下的运行状态，由此计算出频率调整的传递函数，以获得电力系统中频率调整过程中各调频资源的出力情况，根据系统的频率变化获取频率偏差，当获得的最大频差大于频率稳定的边界值便加入储能或火电机组进行系统的调频，直至满足系统频率指标后停止加入，计算出此过程中增加的储能和火电机组的容量便可得到容量替代水平。

## 3 仿真验证分析

### 3.1 参数设定

选定东部某地电网为参照，详细参数如表 1 所示。针对系统采用额定功率 135GW、50Hz 为作为数据标么化，运行中后期使用 0.005p.u. 同功率的储能及火电机组作为辅助调频，电网输出采用阶跃负荷扰动、随机负荷扰动，对照各机组在电网中产生的调频效果，以明确优势之所在。

表1 电网设定参数

电网总负荷		135GW
送电量		26GW
机组发电占比情况	火电机组	56.82%
	水电机组	6.82%
	其他未进行调频的机组	11.95%
一次调频限幅		6%
工频周期延迟情况	火电机组	20个工频周期
	水电机组	
	储能	1个工频周期

### 3.2 替代水平对比

根据上述参数进行储能和火电机组的短时尺度功率支撑对比测试，其中负荷阶跃干扰为 0.04 p.u.、新增调频资源功率 0.005 p.u.，根据公式 (8)、(9) 进行出力情况对比分析，结果如图 1 所示。

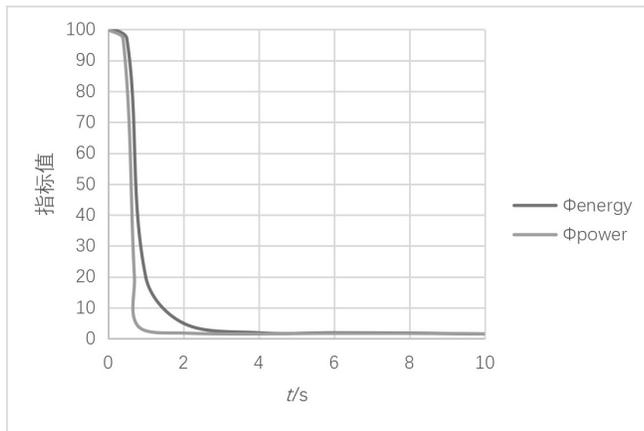


图1 阶跃扰动下的指标值

根据上图可以看出，在初始阶段，储能频率变化所提供的有功功率远超前于火电机组，但随着时间的推移，储能与火电机组的出力情况趋于稳定，由于储能作为可定制调频资源，使其可在短期内发挥出最高的出力，因此可以说，储能对于火电机组的替代水平主要在初期的短时间内，可为电力系统提供短期的频率支撑<sup>[5]</sup>。

### 3.3 储能与火电机组的替代容量对比

设置电力系统频率稳定界限为 0.2Hz、扰动为 0.05p.u.，进行达到同频率最低点时加入的储能与火电机组容量的对照（结果如图 2 所示）。

由上图可发现，当新能源发电所占比重较小的时候电力系统的频率仍在较为稳定的范围，并且频率的偏差未在有效区域内，因此，在此阶段无须新增调频资源装机容量也能满足系统的稳定性。伴随新能源发电比重不断提升，储能调频效果便会愈加得显著，而且对于火电机组的代替水平也会不断增加。当新能源发电比重由 10% 提升至 45% 后储能的容量替代水平将

由 1 急速提升至 14。由于目前的行业发展趋势，高占比的可再生能源并网策略将成为未来发展的主要方向，因此，储能将成为未来行业中极为重要的调频资源。

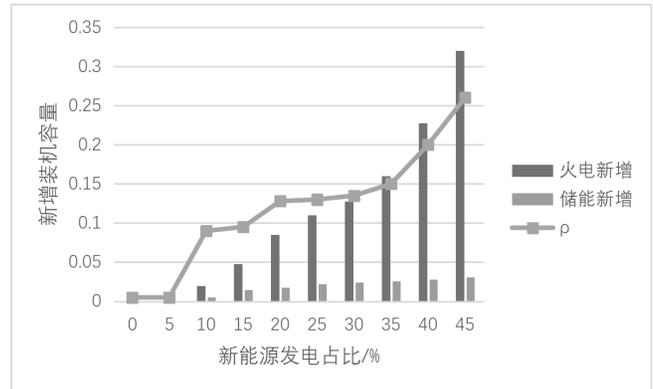


图2 储能的容量替代水平

## 4 结语

综上所述，由储能具有较为显著的频率变化的响应速度，可降低系统最大频率偏差，储能调差系数可有效降低最大频率偏差，对于提升电力系统频率安全性具有重要的作用；储能火电机组的高替代效应体现在初始阶段，但随着时间的推移，所获得的代替效果大幅度降低，最后趋于平缓。

另外，扰动信号参数不会对频率变化初期的高替代能力系数产生影响；伴随新能源发电的比重增加，储能调频效果便会愈加得显著，而且对于火电机组的代替水平也会不断增加。因此，较大比重的可再生能源电力投入所获得优势远趋同规格的火电机组，具有非常重要的应用价值。

### 参考文献：

- [1] 彭占磊, 杨之乐, 杨文强, 等. 电化学储能参与电力系统规划运行方法综述 [J]. 综合智慧能源, 2022, 44 (06): 37-44.
- [2] 袁岑颖, 戴敏敏, 周旭, 等. 电力市场环境下火电机组调频性能提升研究 [J]. 浙江电力, 2022, 41 (06): 84-91.
- [3] 张森林. 关于新型储能市场交易和投资回报机制的思考 [J]. 中国电力企业管理, 2022 (13): 24-27.
- [4] 刘可真, 刘果, 陆永林, 等. 含混合储能辅助的电网负荷频率联合控制 [J]. 电力科学与工程, 2022, 38 (06): 35-44.
- [5] 孙伟伟, 寇潇文, 周光, 等. 区分工作日和非工作日负荷的用户侧储能多目标优化策略 [J]. 中国电力, 2022, 55 (06): 194-201.

作者简介：张彩宏（1983-），男，山西忻州人，工程师，主要从事风电、光伏、火电、储能、输变电研究。