

基于随机模拟和 EMD 的含风光电力系统 AGC 调频储能定容

杨海晶, 饶宇飞, 李朝晖, 孙 鑫

(国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘 要:风电和光伏的大量接入导致电力系统转动惯量减少,从而引发电力系统自动发电控制的调频问题。储能装置能快速、精准的参与电网调频,在实际工程问题中已得到广泛应用。在此背景下,提出一种基于随机模拟和经验模态分解的含风光电力系统自动发电控制储能定容方法。首先,在创建随机生产模拟模型的基础上,采用经验模态分解区域控制偏差从而获得储能调频的高频分量和传统机组调频的低频分量,随后,通过储能负责的高频分量求解储能容量,并考虑储能充放电条件对储能进行模拟。最后,对比无储能和不同储能容量下的调频效果,得到调频效果最优的储能容量。算例仿真及结果表明文中方法有效可行,可以获得含风光电力系统自动发电控制最优储能容量。

关 键 词:自动发电控制;风光;随机生产模拟;经验模态分解;储能定容

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.05.006 中图分类号:TM711 文章编号:1673-9140(2022)05-0058-08

Energy storage capacity determination for AGC frequency modulation in the power system with wind and photovoltaic power based on the stochastic simulation and EMD

YANG Haijing, RAO Yufei, LI Zhaohui, SUN Xin

(Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: With the deep penetration of wind and photovoltaic power, the moment of inertia in the power system is reduced, resulting in the problem of frequency modulation for the automatic generation control of the power system. Energy storage is widely applied in the frequency modulation of power systems due to its fast reaction and accuracy. As a result, random simulation and empirical mode decomposition are combined to propose an energy storage capacity determination method in automatic generation control. Firstly, the empirical mode decomposition is utilized to decompose the regional control deviation into the high-frequency and low-frequency components. The energy storage frequency modulation is responsible for its high-frequency components, while traditional unit frequency modulation is in charge of its low-frequency components. Afterwards, the energy storage capacity is calculated via the high-frequency components of regional control deviation, and the energy storage is simulated considering the energy storage charge and discharge conditions. In the end, the frequency modulation effect is compared for the scenarios with different energy storage capacities and also without energy storage, and the energy storage capacity with the best frequency modulation effect is given consequently. The example simulation and results show that the proposed method is effective and feasible

收稿日期:2020-10-15;修回日期:2021-11-09

基金项目:国网河南省电力公司科技项目(52170220000V)

通信作者:杨海晶(1977—),男,博士,教授级高级工程师,主要从事新能源接入电力系统分析控制技术 & 电化学储能应用技术研究;E-mail:hkyoung@sohu.com

for obtaining the optimal energy storage capacity of automatic generation control in wind and solar power systems.

Key words: automatic generation control; wind power and photovoltaic; stochastic production simulation; empirical mode decomposition; energy storage capacity

随着电网中大规模间歇性和波动性输出特性的风电和光伏不断接入,电力系统中注入功率的扰动增大而抑制频率变化的转动惯量减少,给电力系统自动发电控制带来了新的问题和挑战^[1-2]。在电力系统中,只有当发电机组有足够的调频备用时,才能保证频率的稳定。但是仅依靠传统机组调频,调节精度有限,难以满足调频需求,制约了电网清洁能源的消纳能力。储能具有快速、精准、瞬时吞吐大等特点,在参与调频方面具有巨大的优势^[3-4]。

随着风电和光伏发电渗透率的提高,其对电力可靠性、电能质量的影响不可忽略。频率是衡量电能质量的一个重要指标,系统的调频备用容量需要增加以保证频率稳定。储能系统具有响应迅速、精确跟踪的特点,可以高效率辅助系统调频,随着储能规模化发展和成本大幅下降,储能辅助系统调频使大规模不确定能源接入系统稳定运行成为可能^[5-6]。合理地配置储能容量既能直接影响储能的经济性,还能改善系统的稳定性和安全性,因此储能容量的确定至关重要^[7]。

目前,对储能的容量配置已有大量的研究,文献[8]建立储能系统选址定容多目标优化模型,就多目标粒子群算法在求解过程中存在的一些问题进行改进,提出一种改进的多目标粒子群算法,并以基于信息熵的序数偏好法求解储能的最优接入方案,但没有深入研究储能对调频的影响;文献[9]详细研究了储能电站接入配电网后对原有电流保护的影响,将储能电站输出电流、配电网电流保护加入到约束条件中,进行储能电站的选址定容;文献[10]提出了储能参与一次调频的控制策略,但没有提出容量配置的方法;文献[11]考虑风电爬坡事件,结合了储能和常规机组的技术特点,增强了配置结果的经济性,建立了可选型、定容的储能优化配置模型;文献[12]在电力系统调频需求分析基础上,采用傅里叶变换将调频需求分为高频分量和低频分量,分别由储能和传统机组负责。

经验模态分解(empirical mode decomposition,

EMD)不同于傅里叶分解和和小波分解,它是一种自适应的分解方式,可以分解非线性信号,区域控制偏差(area control error, ACE)是一种非平稳、非线性的信号,可以用 EMD 分解^[13-14]。文献[15]通过 EMD 分解对 ACE 信号进行分解、重构、寻找分界三步划分高低频段,确定储能电池参与二次调频的容量配置。

随机生产模拟是电力系统研究的一个重要工具,随机生产模拟通过考虑负荷随机性和机组故障,模拟发电机组的各种生产情况,得到系统最优运行方式下的生产成本以及可靠性指标^[16],文献[17]针对风电机组出力的间歇性和波动性,提出了基于等效电量频率法的电力系统随机生产模拟方法,用来评估风电场接入对电力系统生产运行的影响。当前关于随机生产模拟的研究中,已有文献加入了风光和储能的情况,但没有考虑这些因素对频率控制的影响。

针对上述问题,该文在建立随机生产模拟模型的基础上,将 ACE 信号进行 EMD 分解,得到数个本征分量。通过设置截止频率将 ACE 信号划分为高频和低频两部分,由储能来负责高频分量,减小系统调频压力。根据不同截止频率下储能负责的调频需求确定储能容量。进而考虑储能充放电条件、自动发电控制(automatic generation control, AGC)随机净调节容量需求等因素,通过随机生产模拟储能 AGC 调频。最后通过对比不同储能容量下供应控制偏差(supplier control error, SCE)和频率均方差结果选取调频效果最好的方案,确定储能容量。

1 基于 EMD 的 ACE 信号分配

首先分析风电和光伏发电接入后对系统的影响。净负荷为传统火电机组承担的负荷,系统的频率主要受净负荷波动的影响,本文考虑风光优先消纳,系统净负荷为

$$P_N(t) = P_L(t) - P_W(t) - P_P(t) \quad (1)$$

式中 P_N 为净负荷; P_L 为原始负荷; P_w 为风电出力; P_p 为光伏出力。

从典型日的净负荷数据来看, 风电和光电的并网会导致系统的净负荷变化更加剧烈。此处引入净负荷波动速率这一概念, 描述净负荷的波动情况:

$$V_N(t) = \frac{P_N(t+1) - P_N(t)}{\Delta t} \quad (2)$$

式中 V_N 为净负荷波动速率; Δt 为相邻两点时间差。根据式(1)中的净负荷求得净负荷波动速率。

风光接入后, 净负荷波动速率大于原始负荷说明风光接入后频率变化程度加剧, ACE 信号波动加剧, 系统的调频变得复杂, 引入储能参与系统调频。

EMD 是一种自适应的分解方式, 其不需设定基函数, 可以根据信号本身的时间尺度进行分解, 在非线性非平稳信号时有其独特的优势。因此, EMD 在分解 ACE 信号时有其独特的优势。将 ACE 信号进行 EMD 分解, 得到不同频率成分的固有模态函数分量。

在 EMD 分解 ACE 信号得到的本征分量中, 频率由高到低为 I_{MF1} 、 I_{MF2} 、 \dots 、 I_{MF_n} 。通过设置截止频率将 ACE 信号分为高频分量和低频分量, 高频由储能机组负责, 低频由传统火电机组负责, 根据分配给储能的 ACE 信号来确定储能容量。当将第 m 个本征分量的频率设置为截至频率时, I_{MF1} 、 I_{MF2} 、 \dots 、 I_{MF_m} 为高频分量, 由储能系统负责; $I_{MF_{m+1}}$ 、 $I_{MF_{m+2}}$ 、 \dots 、 I_{MF_n} 和残差为低频分量, 由传统机组负责。

2 储能容量确定及评价指标

要使储能可以承担其分配的 ACE 功率信号, 储能系统的功率容量应不小于时段 T 内其被分配功率的平均值, 储能系统的功率容量应满足^[14]:

$$P_{\text{bess}} \geq \max \left\{ \text{mean}(P_s^-(t)) \eta^-, \frac{\text{mean}(P_s^+(t))}{\eta^+} \right\} \quad (3)$$

式中 $P_s(t)^+$ 、 $P_s(t)^-$ 分别为储能 t 时刻放电功率和充电功率; η^+ 、 η^- 分别为储能的放电效率和充电效率; mean 指取平均值。其中, $0 \leq t \leq T$ 。

储能系统的能量容量应不小于其被分配的 ACE 信号的能量需求, 储能系统的能量容量满足:

$$E_{\text{bess}} \geq \max \left\{ \frac{\max \left[\int_0^{\alpha T} (P_s^+ - P_s^- \eta^-) dt \right]}{S_{\max} - S(0)}, \frac{\max \left[\int_0^{\alpha T} (P_s^- \eta^- - P_s^+) dt \right]}{S(0) - S_{\min}} \right\} \quad (4)$$

式中 S_{\max} 为储能荷电状态上限; S_{\min} 为储能荷电状态下限; $S(0)$ 为初始荷电状态。其中, $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

当式(4)取等号时可以得到该情况下储能的功率和容量。设置不同储能容量场景, 在不同场景下进行随机生产模拟, 对比不同储能容量下的调频效果。本文采用的评价指标如下。

1) 北美电力系统可靠性委员会发现 SCE 可以直观地反应系统的调频能力。

$$\partial_{\text{SCE}} = P_a - P_s \quad (5)$$

式中 P_a 为机组发出的实际功率; P_s 为机组功率调节指令; ∂_{SCE} 为功率偏差。

2) 欧盟发输电联盟以频率偏差来评价其调频能力, 即实际功率与额定功率的差值, 由于频率偏差有正有负, 采用频率的均方差作为评价指标, 其表达式为

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f - f_N)^2} \quad (6)$$

其中, γ 反应了系统频率分布的离散程度, γ 越小系统频率分布越集中于额定频率。

3 含风光和储能的随机生产模拟

3.1 光伏发电组件建模

在一天之内太阳光照辐射近似服从贝塔分布, 贝塔分布的概率分布函数^[18]为

$$F(E) = \frac{\Gamma(\lambda + \mu)}{\Gamma(\lambda)\Gamma(\mu)} \int_0^{E/E_m} t^{\lambda-1} (1-t)^{\mu-1} dt \quad (7)$$

式中 $F(E)$ 为辐射强度小于 E 的概率; E_m 为辐射强度的最大值; λ 、 μ 为贝塔分布 2 个形状参数。

光伏系统的出力 P_p 与光照辐射强度 E 、太阳能电池阵列面积 D 及光电转换效率 η 有着直接的关系, 其出力模型^[18]为

$$P_p = ED\eta \quad (8)$$

计算各种辐射条件概率分布情况及改状态输出的有功功率, 可以准确地利用太阳辐射强度历史

数据,对光伏发电机组进行随即生产模拟。

3.2 风电发电机组建模

两参数威布尔分布常被用作描述风速的概率分布特征,基于威布尔分布的概率分布函数^[19]为

$$F(V) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (9)$$

式中 $F(V)$ 为风速小于 V 的概率; k 为形状参数; c 为尺度参数。

风机输出有功功率^[19]为

$$P_w = \begin{cases} 0, & v \leq v_{ci} \\ P_r \cdot \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3}, & v_{ci} < v \leq v_r \\ S_r, & v_r < v \leq v_{co} \\ 0, & v > v_{co} \end{cases} \quad (10)$$

式中 v_{ci} 为风电机组的切入风速,本文取 3 m/s; v_r 为风电机组的额定风速,本文取 12 m/s; v_{co} 为风电机组的切出风速,本文取 25 m/s; P_r 为风电机组的额定输出功率。

计算各种风速条件概率分布情况及其输出的有功功率,利用大量的历史风速数据,对风电模型进行随机生产模拟。

3.3 储能机组建模

根据储能负责的 ACE 信号来决定储能的充放电,在确定充电还是放电后,求取储能的充放电功率,在对储能的荷电状态(state of charge, SOC)进行更新,再通过等效电量法对负荷,储能进行随机生产模拟。

当分配给储能的 ACE 大于 0 时,即调频压力的方向为负,此时储能应进行充电储存电量,在运行过程中储能的充电功率受储能最大容量、储能当前容量、最大充电功率等参数的限制,储能的充电功率为

$$P^-(t) = \min\left\{\frac{S_{S_{\max}} - S_{S(t)}}{\Delta t} \cdot \eta^-, p_{\max}^-\right\} \quad (11)$$

式中 $S_{S_{\max}}$ 为储能最大荷电量; $S_{S(t)}$ 为 t 荷电量; Δt 为时段间隔。

在时刻 t 时,储能处于充电状态, SOC 随时间增大,更新后的 SOC 状态为

$$S_{S(t+\Delta t)} = S_{S(t)} + P^-(t) \Delta t \cdot \eta^- \quad (12)$$

当分配给储能的 ACE 小于 0 时,即调频压力的方向为正,此时储能应进行放电,在运行过程中储

能的放电功率受储能最小容量、储能当前容量、最大放电功率等参数的限制,储能的放电功率为

$$P^+(t) = \min\left\{\frac{(S_{S(t)} - S_{S_{\min}}) \Delta t}{\Delta t} \cdot \eta^+, p_{\max}^+\right\} \quad (13)$$

式中 $S_{S_{\min}}$ 为储能最小荷电量。

在时刻 t 时,储能处于放电状态, SOC 随时间减小,更新后的 SOC 状态为

$$S_{S(t+\Delta t)} = S_{S(t)} - \frac{P^+(t) \Delta t}{\eta^+} \quad (14)$$

根据文 2 中求取的不同情况下储能的功率和容量,结合储能的充放电状态方程和 SOC 更新后的状态方程,对储能系统进行随机生产模拟,通过对比不同储能容量下的 SCE 和均方差结果确定最优储能容量。

3.4 随机生产模拟下 ACE 求解

基于随机生产模拟后获取风速、辐射强度数据,根据式(8)、(10)获取随机生产模拟下风光出力数据,具体求解流程如图 1 所示。本文主要研究风光接入对系统频率的影响,忽略负荷波动和火电机组波动,互联系统频率变化的表达式为

$$\Delta f = \frac{\Delta P_w + \Delta P_p}{K_s} \quad (15)$$

式中 K_s 为系统的单位调节功率; ΔP_w 为风电出力波动; ΔP_p 为光伏出力波动。

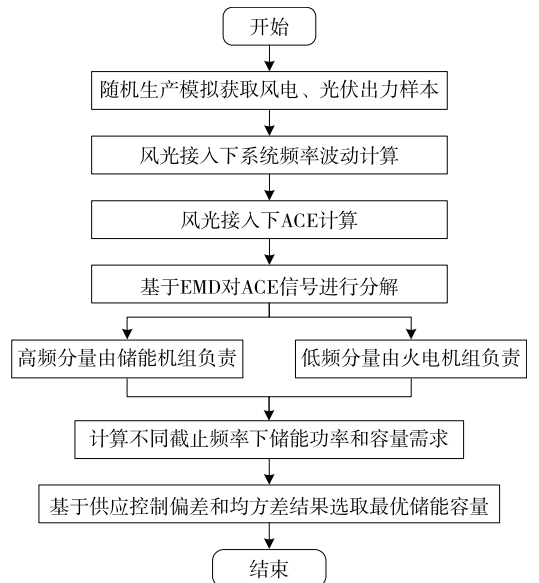


图 1 求解流程

Figure 1 Solution flow chart

AGC的主要作用是可通过计算ACE调整各区AGC机组的有功出力。AGC有3种基本的控制模式:定频率控制模式(flat frequency control,FFC);定联络线功率控制模式(flat tie-line control,FTC);联络线频率偏差控制模式(tie-line load frequency bias control,TBC),本文算例中不考虑两系统互联,采用FFC控制模式,ACE的表达式为

$$A_{CE} = B \Delta f \quad (16)$$

式中 B 为频率偏差系数。

4 实例分析

1) 仿真模型建立。

根据本文所提策略,建立储能辅助火电机组调频仿真模型,如图2所示。

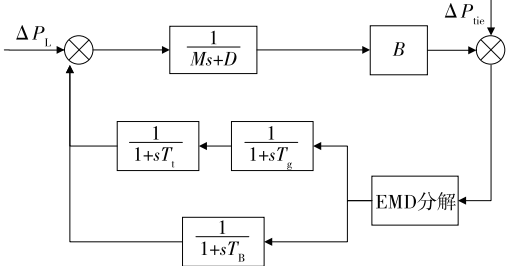


图2 储能辅助火电机组AGC调频模型

Figure 2 AGC frequency regulation model of thermal power unit assisted by energy storage

图2中, ΔP_L 为区域负荷变化量; ΔP_{tie} 为联络线功率偏差; B 为频率偏差系数; M 为电网惯性时间常数; D 为负荷阻尼系数; T_g 、 T_t 、 T_B 分别为调速器、发电机和储能机组的时间常数。仿真参数如表1所示。

2) 风光随机生产模拟。

设某地区总装机容量为5 500 MW,其中,风电装机为1 000 MW,光伏装机1 000 MW。最高用电负荷为3 500 MW,采用随机生产模拟生成100组风速和辐射强度数据,其期望值如图3所示。

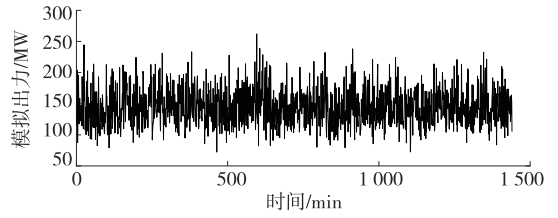
在随机生产模拟风电和光伏接入下,根据式(15)、(16)可以得到系统的频率波动和ACE信号,风电和光伏接入下系统的ACE数据如图4所示。

3) ACE信号分解。

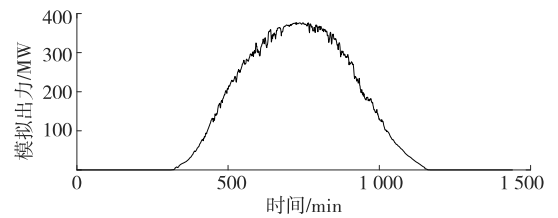
对得到的ACE数据进行EMD分解,得到8个IMF分量及余项RES,如图5所示。

表1 仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters		
参数	参数名称	数值
B	频率偏差系数	70
M	电网惯性时间常数	5
D	负荷阻尼系数	1
T_g	调速器时间常数	0.08
T_t	发电机时间常数	0.4
T_B	储能机组时间常数	0.1
S_{max}	储能荷电状态上限	0.9
S_{min}	储能荷电状态下限	0.1
η^+, η^-	储能充放电效率	0.9
k	威布尔分布形状参数	1.9
c	威布尔分布尺度参数	6.83
λ	贝塔分布形状参数	2
μ	贝塔分布形状参数	3
K_s	系统单位调节功率	2 100



(a) 风电



(b) 光伏

图3 日风光随机生产模拟出力

Figure 3 Daily wind power and photovoltaic stochastic production simulation output

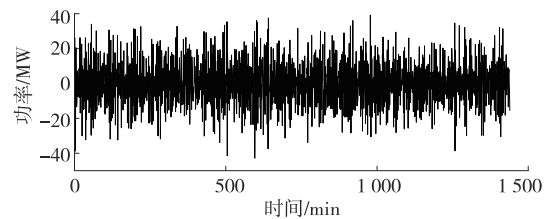


图4 风光接入下ACE数据

Figure 4 ACE data under wind power and photovoltaic access

4) 确定储能容量。

由图5可知,ACE信号经过EMD分解得到了8个本征分量,频率由高到低分别为 I_{MF1} 、 I_{MF2} 、 \dots 、 I_{MF8} ,以各个本征分量的频率作为截止频率,对ACE信号进行高低频划分,高频分量由储能系统负

责,再根据本文容量求取的方法确定了不同截止频率下的储能容量。随机生产模拟和典型日本 ACE 下的储能功率容量需求分别如表 2、3 所示。

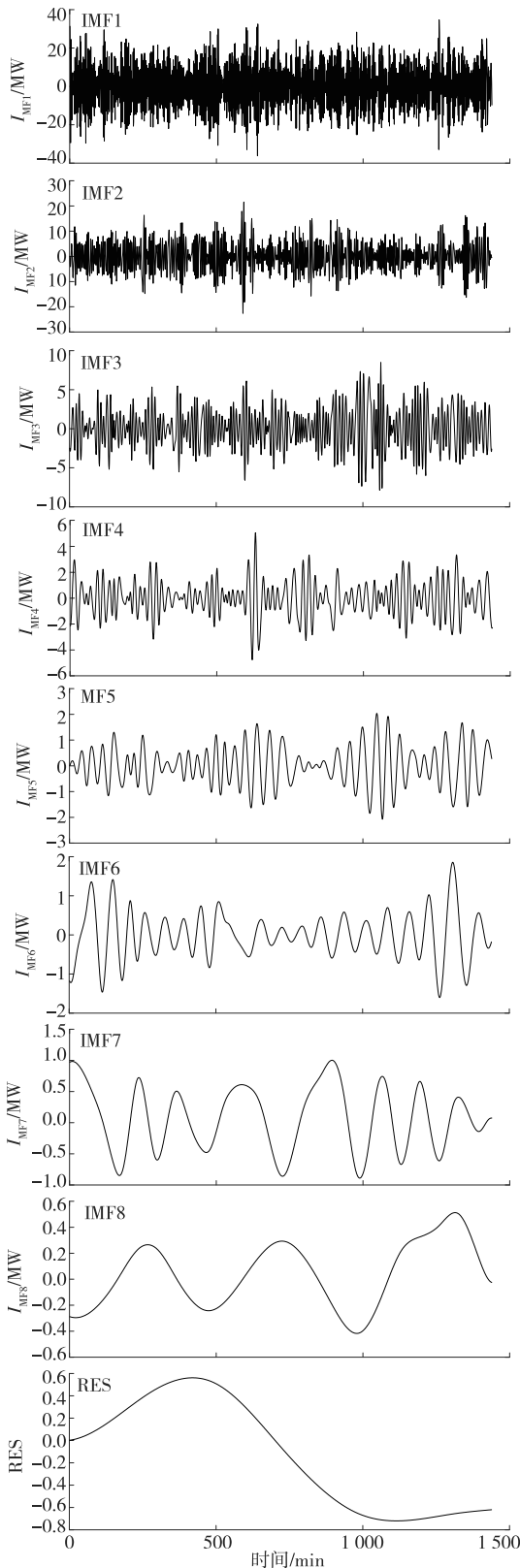


图 5 分解后的 IMF 分量及余项

Figure 5 IMF component and remainder after decomposition

表 2 随机生产模拟下储能功率、容量需求

Table 2 Energy storage power capacity demand under the stochastic production simulation

截止频率	功率/MW	容量/(MW·h)
I_{MF1}	12.33	6.01
I_{MF2}	12.33	7.34
I_{MF3}	12.32	7.58
I_{MF4}	12.15	8.60
I_{MF5}	12.25	9.04
I_{MF6}	12.20	9.00
I_{MF7}	12.13	6.08
I_{MF8}	12.19	8.50

表 3 典型日 ACE 下储能功率、容量需求

Table 3 Energy storage power capacity demand under the typical daily area control error

截止频率	功率/MW	容量/(MW·h)
I_{MF1}	4.43	2.42
I_{MF2}	4.61	3.25
I_{MF3}	4.90	5.23
I_{MF4}	4.93	4.51
I_{MF5}	4.98	6.92
I_{MF6}	5.05	8.96
I_{MF7}	5.15	9.17
I_{MF8}	5.05	10.23

对比表 2、3 可知,在随机生产模拟场景下,ACE 波动规律,高频分量较大,不同截止频率下储能功率容量需求接近;而典型日场景下,由于风光出力的随机性较大,ACE 波动不规律,高频分量较小,不同截止频率下储能功率容量需求差异较大。在随机模拟场景下,储能功率容量需求普遍大于典型日,因此。采用随机生产模拟考虑了风光出力的随机性,得到的储能容量可以满足大部分典型日下的储能需求。

5) 储能容量配置结果分析。

根据图 2 搭建的储能辅助火电机组 AGC 调频模型,对表 2 中 8 种储能容量配置结果和无储能情况下分别进行仿真,8 种截止频率对应储能容量分别记为储能 1~8。某一时段放大如图 6 所示,储能辅助火电机组参与调节 ACE 后,响应更急迅速,调节更加精准,能够缓解电力系统 AGC 调频压力。

在不同储能容量配置和无储能场景下,供应控制偏差和频率均方差的结果如表 4、5 所示。供应控

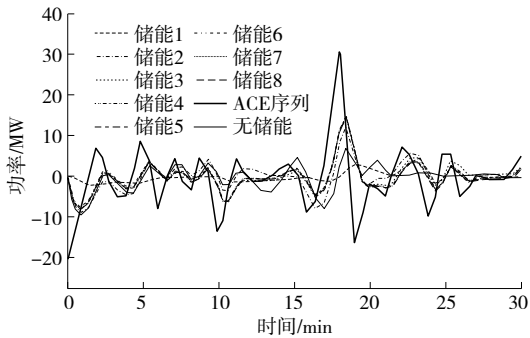


图6 某一时段储能及火电机组响应ACE曲线

Figure 6 ACE curve of energy storage and thermal power unit response in a certain period

表4 不同储能容量下SCE结果

Table 4 SCE results with different energy storage capacities

储能	mean SCE /MW	储能	mean SCE /MW
1	7.15	6	5.33
2	5.85	7	5.31
3	5.37	8	5.32
4	5.32	无储能	12.27
5	5.31		

表5 不同储能容量下频率均方差结果

Table 5 Frequency mean square deviation results with different energy storage capacities

储能	α	储能	α
1	0.010 263 58	6	0.007 657 83
2	0.008 775 63	7	0.007 663 24
3	0.007 965 21	8	0.007 657 83
4	0.007 652 74	无储能	0.027 654 70
5	0.007 663 24		

制偏差的结果中只能看到极值,不便分析,因此采用其绝对值的平均值来分析不同情况下的调频效果。

由表4可知,无储能时的供应控制偏差远大于配置储能后的供应控制偏差。且在储能4~8时,以 $I_{MF4} \sim I_{MF8}$ 为截止频率配置储能时供应控制偏差较小,调频效果最好;由表5可知,在无储能场景下频率的均方差最大。在储能4~8时,频率的均方差较小,即系统的实际频率最集中于额定频率,系统的调频效果较好。考虑配置储能的经济性,选取储能7为最优储能容量,即最优储能容量为12.13 MW/6.08 MW·h。

5 结语

针对含风光电力系统AGC调频问题,本文建立风电和光伏随机生产模拟模型,并在此基础上得到风光接入下系统的频率波动及ACE信号。基于EMD分解划分ACE信号的高低频分量,确定不同截止频率下储能容量需求,再根据调频效果确定最优储能容量。仿真结果表明:

1)含风光电力系统ACE信号波动大,对储能的需求更高,迫切需要配置储能缓解传统机组调频压力;

2)考虑风速和辐射强度的随机性,随机生产模拟可以包含大部分实际场景,所求ACE信号更有普遍性,储能容量更符合实际需求;

3)储能辅助火电机组参与AGC调频后,系统响应ACE信号更加迅速,调节更加精准。

后续工作将考虑不同新能源渗透率下储能调频需求,研究不同新能源渗透率下储能参与调频的运行模式。

参考文献:

- [1] 鄯朝辉,黄慧,李威,等.周期通信对储能系统参与电网调频的影响分析[J].电力系统保护与控制,2020,48(1):41-47.
QIE Zhaohui, HUANG Hui, LI Wei, et al. Analysis of the influence of periodic communication on the participation of energy storage system in power grid frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 41-47.
- [2] 张健,李天慧,马刚,等.基于智能负载的光伏并网电压和频率稳定方法研究[J].智慧电力,2020,48(10):52-57.
ZHANG Jian, LI Tianhui, MA Gang, et al. Voltage and frequency stabilization method for grid-connected photovoltaic system based on smart load[J]. Smart Power, 2020, 48(10): 52-57.
- [3] 丁明,施建雄,韩平平,等.光储系统参与电网调频及调峰的综合控制策略[J].中国电力,2021,54(1):116-123+174.
DING Ming, SHI Jianxiong, HAN Pingping, et al. An integrated control strategy for photovoltaic-energy storage

- system participating in frequency regulation and peak shaving of power grid[J]. *Electric Power*, 2021, 54(1): 116-123+174.
- [4] 杨国清,薛雨,姚李孝,等.光热电站并网对新能源电网运行特性的影响研究[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(5):137-139+146.
YANG Guoqing, XUE Yu, YAO Lixiao, et al. A study on the influence of the connected photo-thermal power station on the operation characteristics of the new energy grid[J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(5):137-139+146.
- [5] 何永秀,陈倩,费云志,等.国外典型辅助服务市场产品研究及对中国的启示[J]. *电网技术*, 2018, 42(9):2915-2922.
HE Yongxiu, CHEN Qian, FEI Yunzhi, et al. Typical foreign ancillary service market products and enlightenment to China[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(9):2915-2922.
- [6] 刘起兴,和识之,卢伟辉,等.电池储能辅助二次调频的模型预测控制方法[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(23):119-125.
LIU Qixing, HE Shizhi, LU Weihui, et al. Model predictive control method for battery energy storage assisting secondary frequency regulation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(23):119-125.
- [7] FERNÁNDEZ-BLANCO R, DVORKIN Y, XU B, et al. Optimal energy storage siting and sizing: a WECC case study[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(2):733-743.
- [8] 吴小刚,刘宗歧,田立亭,等.基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. *电网技术*, 2014, 38(12):3405-3411.
WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(12):3405-3411.
- [9] 杨炼,范春菊,郇能灵,等.基于继电保护与改进算法的储能电站选址定容[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(3):53-60.
YANG Lian, FAN Chunju, WU Nengling, et al. Energy storage station locating and sizing based on relay protection and improved algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(3):53-60.
- [10] 李培强,丰云鹤,李欣然,等.考虑超短期负荷预测的储能电池参与电网一次调频控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(19):87-93.
LI Peiqiang, FENG Yunhe, LI Xinran, et al. Control strategy for energy storage battery participating in primary frequency regulation of power grid considering ultra-short-term load forecasting[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(19):87-93.
- [11] 王思渊,江全元,葛延峰.考虑风电爬坡事件的储能配置[J]. *电网技术*, 2018, 42(4):1093-1100.
WANG Siyuan, JIANG Quanyuan, GE Yanfeng. Optimal configuration of energy storage considering wind ramping events[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(4):1093-1100.
- [12] 胡泽春,谢旭,张放,等.含储能资源参与的自动发电控制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(29):5080-5087.
HU Zechun, XIE Xu, ZHANG Fang, et al. Research on automatic generation control strategy incorporating energy storage resources[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29):5080-5087.
- [13] 黄浩,胡峰.基于经验模态分解的电能质量信号消噪新方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2006, 21(4):27-30.
HUANG Hao, HU Feng. A new method of the power quality signal denoising based on empirical mode decomposition[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2006, 21(4):27-30.
- [14] 贾燕冰,郑晋,陈浩,等.基于集合经验模态分解的火-储联合调度调频储能容量优化配置[J]. *电网技术*, 2018, 42(9):3930-2937.
JIA Yanbing, ZHENG Jin, CHEN Hao, et al. Capacity allocation optimization of energy storage in thermal-storage frequency regulation dispatch system based on EEMD[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(9):3930-2937.
- [15] 汤杰,李欣然,黄际元,等.以净效益最大为目标的储能电池参与二次调频的容量配置方法[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(5):77-86.
TANG Jie, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Capacity allocation of BESS in secondary frequency regulation with the goal of maximum net benefit[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(5):77-86.