

指数函数功率重构的超级电容荷电控制策略研究

马丙泰¹, 刘海涛^{1,2}, 郝思鹏^{1,2}, 陆恒¹, 张埕瑜¹

(1. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167;

2. 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心, 江苏 南京 211167)

摘要: 光伏及混合储能系统中, 常用变分模态分解(VMD)实现系统剩余功率分配, 但其中分解模态数、二次惩罚因子的取值直接影响功率重构的误差, 常用的凹型、S型函数惯性权重误差较大。以皮尔逊相关系数为适应度函数, 提出采用指数型函数惯性权重粒子群算法参数优化VMD参数, 获得VMD算法中各自 $[K, \alpha]$ 最优值组合, 分解系统剩余功率, 将剩余功率合理分配至蓄电池和超级电容。进而提出在考虑超级电容荷电状态(SOC)下的混合储能功率互补优化控制策略, 使其SOC运行于稳定区域。算例分析中, 采用对称平均绝对百分误差(SMAPE)对比分析了三种惯性权重函数优化算法下的功率重构误差, 并考虑超级电容SOC与优化控制。结果表明, 采用指数型函数惯性权重算法得到的功率重构误差最小, 并使得超级电容SOC控制在稳定区域, 避免过充过放现象, 延长其使用寿命。

关键词: 功率重构; 指数型函数惯性权重; 变分模态分解; 功率互补控制

中图分类号: TM74 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24074

Research on Charging Control Strategy of Supercapacitor Based on Exponential Function Power Reconstruction

MA Bingtai¹, LIU Haitao^{1,2}, HAO Sipeng^{1,2}, LU heng¹, ZHANG Chengyu¹

(1. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Engineering, Nanjing 211167, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Distribution Network Intelligent Technology and Equipment Collaborative Innovation Center, Nanjing 211167, Jiangsu, China)

Abstract: In photovoltaic and hybrid energy storage system, variational mode decomposition (VMD) is commonly used to realize the distribution of system residual power, but the number of decomposed modes and secondary penalty factor value affect the error of power reconstruction directly, and the inertia weight error of commonly used concave and S-type functions is large. Taking Pearson correlation coefficient as fitness function, an exponential function inertia weight particle swarm optimization algorithm was proposed to optimize VMD parameters, obtain the $[K, \alpha]$ in the VMD algorithm respectively, decompose the P_{hess} and distribute the P_{hess} to the battery and supercapacitor reasonably. Then, a hybrid energy storage power complementary optimal control strategy considering the state of charge (SOC) of supercapacitor was proposed to make its SOC operate in a stable region. In the example analysis, the symmetrical mean absolute percentage error (SMAPE) was used to compare and analyze the power reconstruction error under three inertia weight function optimization algorithms, the SOC of supercapacitor and optimization control were considered. The results show that the power reconstruction error obtained by using the exponential function inertia weight algorithm is the smallest, the SOC of supercapacitor is controlled in the stable region to avoid overcharge and overdischarge and prolong its service life.

Key words: power reconfiguration; exponential function inertia weight; variational modal decomposition (VMD); power complementary control

在微电网孤岛运行时, 风、光等新能源存在 的波动性、间歇性和随机性特点, 会给系统的功

基金项目: 2018江苏省高校重大项目(18KJA470002); 国家自然科学基金(51777197); 江苏省研究生实践创新计划(SJCX22_1072)

作者简介: 马丙泰(1994—), 男, 硕士研究生, Email: 3037309475@qq.com

通讯作者: 刘海涛(1972—), 女, 博士, 教授, Email: 13851424346@163.com

率平衡以及电能质量带来较大影响,为平抑功率波动而配置相应储能系统的需求变得不可或缺^[1]。超级电容器具有功率密度大、循环次数高的特点,常用于平抑高频率、小幅度波动,但是单位容量成本过高;锂电池具有能量密度高、严格循环次数限制的特点,常用于平抑低频率、大幅度波动,最大程度延长其使用寿命^[2]。考虑各类储能自身特性,通常将能量型与功率型储能联合使用,构成混合储能系统。针对孤立光伏混合储能系统,将系统剩余分量由混合储能进行消纳平抑。为合理的将系统剩余功率分配至混合储能单元,文献[3-4]分别利用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)与低通滤波(low pass filtering, LPF)进行剩余功率分配,但EEMD数据计算量大,运行时间长;而采用LPF方法需要设置合适的截止频率来实现混合储能功率合理分配。文献[5]通过对微电网净负荷功率进行离散傅里叶变换,对混合储能系统的容量进行优化配置。文献[6]基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和神经网络的平抑风功率波动的混合储能系统容量优化配置方法;但EMD端点效应及模态重叠较为严重。文献[7-8]研究小波包分解法的混合储能平抑风电波动控制策略;但小波包分解所需数据量较多,计算工作量较大。现有研究表明变分模态分解(variational modal decomposition, VMD)可以很好地对信号进行分析;VMD是一种自适应、准正交、完全非递归的信号分析方法,鲁棒性能好;针对频率相近的谐波信号分析时,具有很好的优越性^[9]。文献[10-11]分别通过自适应VMD、多种群差分进化算法和包络熵适应度函数来优化VMD,以解决VMD中 K 和 α 难以自适应确定的问题;从而实现系统功率初级分配。文献[12]采用粒子群(particle swarm optimization, PSO)参数优化VMD,获得 K, α 值并进行初次功率分配。平均绝对百分误差(mean absolute percentage error, MAPE)常用于衡量实际数据与真实应用(预测)数据间准确性的统计指标;但当存在有实际值为0时,MAPE将无法计算;针对该问题采用对称平均绝对百分误差(symmetrical mean absolute percentage error, SMAPE)替代MAPE,并可应用于功率等时间序列分析中^[13]。粒子群及改进算法适用于求解多目标优化问题^[14],采用不同惯性权重对寻优结果会有不同的效果。文献[15]

采用线性微分递减惯性权重及线性调整的学习因子对算法进行优化,避免陷入局部最优,增强全局寻优能力。文献[16]采用PSO对具体算例通过对比确定不同优化算法及惯性权重会对结果产生不同的影响。相关研究表明,对剩余功率只进行一次分配并不能很好地适应新能源发电混合储能系统;通常考虑超级电容充放电速度快的特性,需对混合储能系统进行二次功率分配,缓解超级电容荷电变化速度,避免过充过放现象。基于超级电容荷电状态(state of charge, SOC)的模糊控制对储能初次功率分配进行二次分配,结果表明基于模糊控制的初级功率优化修正,使储能元件在SOC安全范围内工作,能够极大延长储能元件的经济寿命^[10]。文献[17-18]对系统剩余功率进行一次分配,再分别采用一致性算法与储能装置的SOC信息对一次功率进行修正,实现功率二次分配。

综上,在已有研究基础上,本文以孤立光伏发电混合储能系统典型模型为基础,对系统剩余功率分配方法及混合储能功率分配控制进行研究。通过对三种函数惯性权重PSO参数优化VMD后功率信号重构进行对比分析,表明采用指数型函数惯性权重时功率重构最接近原始功率信号(重构误差小);并将经分解后的功率信号合理分配给混合储能系统,实现混合储能初次功率分配。进而提出基于超级电容荷电功率互补控制的二次功率分配策略,该控制策略能够较好地缓解超级电容临界充放电SOC趋势,避免过充过放现象,延长其使用寿命。

1 参数优化变分模态分解

1.1 独立光储系统及剩余功率

在不计损耗的理想情况下,负荷系统功率及光伏发电功率两者的差值称为系统剩余功率,其表达式如下:

$$P_{\text{hess}} = P_b + P_{\text{sc}} = P_{\text{LD}} - P_{\text{new}} \quad (1)$$

式中: P_b, P_{sc} 为蓄电池与超级电容承担的功率分量; P_{LD} 为负荷功率(直流/交流负荷功率); P_{new} 为新能源输出功率(即光伏功率 P_{pv})。

当 $P_{\text{hess}} < 0$ 时,混合储能系统充电;当 $P_{\text{hess}} > 0$ 时,混合储能系统放电。VMD是将非平稳信号非递归变分模态分解的方法,是一种通过寻找各种模态函数及其中心频率的集合从而分析信号的方法,具体内容如文献[9, 12]所示。典型独立光储结构如图1所示。

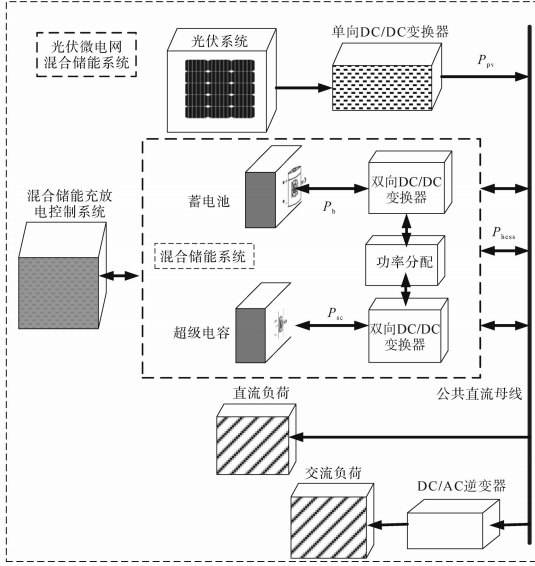


图1 典型独立光储结构图

Fig.1 Structure diagram of typical isolated optical storage system

1.2 基于指数型函数惯性权重PSO优化VMD参数

VMD对信号分解时,通常需要预设 K 和 α 值,合理的设置 $[K, \alpha]$ 能达到较为理想的分解效果。传统方法中通过试凑法来确定较合理的 K 与 α 值^[11]。研究表明 K 和 α 取值不合理时,会使得经VMD分解后重构信号与原始信号出现较大偏差。因此选择合适的 K 与 α 值是运用VMD分解系统 P_{hess} 信号的核心。本文采用PSO对此两个参数进行优化,相关学者已提出了多种惯性权重函数来优化PSO寻优过程,避免陷入局部最优,PSO中速度与位置更新公式、指数型函数惯性权重的表达式如下:

$$V_{id}^{k+1} = wV_{id}^k + c_1r_1(P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2r_2(P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (2)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (3)$$

$$w = w_{\text{end}} + (w_{\text{start}} - w_{\text{end}}) \frac{\exp(-20 \times k^6)}{(\text{maxgen})^6} \quad (4)$$

式中: w 为惯性权重; $w_{\text{start}}, w_{\text{end}}$ 为起始、终止惯性权重值; c_1, c_2 为学习因子; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; i 为粒子序号, $i=1, 2, \dots, n$;maxgen为迭代次数最大值; d 为维度; k 为当前迭代次数。

PSO优化VMD参数具体流程如图2所示。本文中PSO设置初始参数如下: $c_1=c_2=1.494, w_{\text{start}}=0.8, w_{\text{end}}=0.4, \text{maxgen}=10$,种群规模 $\text{sizepope}=20, d=2$ 。

采用PSO优化参数首先要确定适应度函数。皮尔逊相关系数是描述两信号相关程度的方法,相关系数越大,两信号相关性越强,反之相关性越弱。相关系数表达式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中: x_i 为原信号; y_i 为重构后的信号; $\bar{x}, \bar{y}$ 为均值。

VMD中, K 值应为整数, α 的取值范围应为 $[2\ 000, 4\ 000]$ ^[19]。

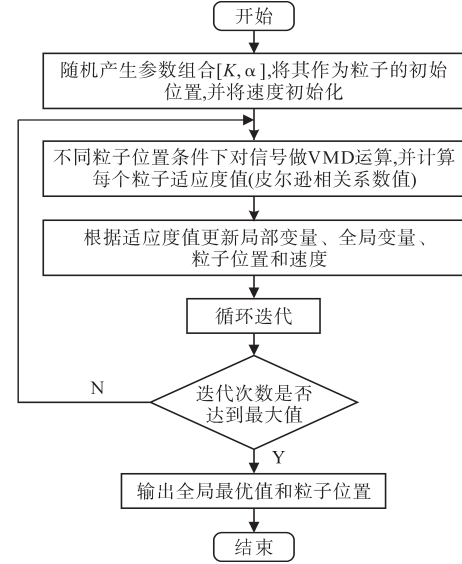


图2 粒子群优化VMD参数流程

Fig.2 The process of VMD parameters optimized by PSO

2 混合储能系统功率分配

2.1 混合储能系统初次功率分配方法

相关文献表明,超级电容器的一次充放电循环时间一般小于50 min^[20],因此选择超级电容的充放电频率应大于 0.3×10^{-3} Hz。蓄电池与超级电容承担的功率分量表达式如下:

$$\begin{cases} P_b = \sum_{k=1}^m u_k(t) \\ P_{sc} = \sum_{k=m+1}^M u_k(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: M 为VMD分解出的模态函数 $u_k(t)$ 的个数。

SMAPE计算如下式:

$$SMAPE = \frac{100\%}{T} \sum_{t=1}^T \frac{|f_t - y_t|}{(|f_t| + |y_t|)/2} \quad (7)$$

式中: f_t 为重构后的功率信号; y_t 为实际功率信号; T 为总运行时间; t 为当前运行时刻。

为验证PSO中选择指数型函数惯性权重优化VMD算法的优越性。首先,在PSO中采用三种不同函数惯性权重,进行VMD参数优化,获得 $[K, \alpha]$ 组合,并进行功率信号重构。本文分别采用指数型函数、凹型函数与S型函数惯性权重进行对比分析,确定指数型函数惯性权重能够获得 $[K, \alpha]$ 最优组合,并使得重构信号最接近原始信号(即重构误差最小),具体结果见算例分析中;其次,为体现VMD分解的优势,分别采用LPF, EMD对同

一系统 P_{hess} 进行分解,并对分解后的信号进行傅里叶变换,得到相应频谱图。

图 3 为 P_{hess} 经过 LPF 分解后,超级电容承担功率的频谱图,图 4 为 P_{hess} 经 EMD 分解后各固有模态分量(intrinsic mode function, IMF)及频谱图。

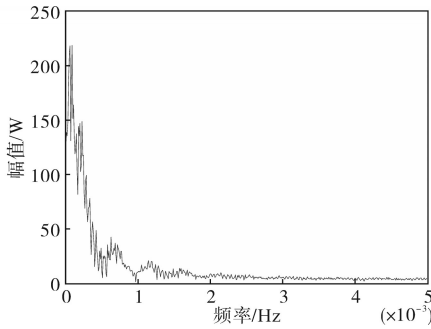


图 3 低通滤波后超级电容承担功率的频谱图

Fig.3 Spectrum diagram of power borne by ultracapacitor after low pass filtering

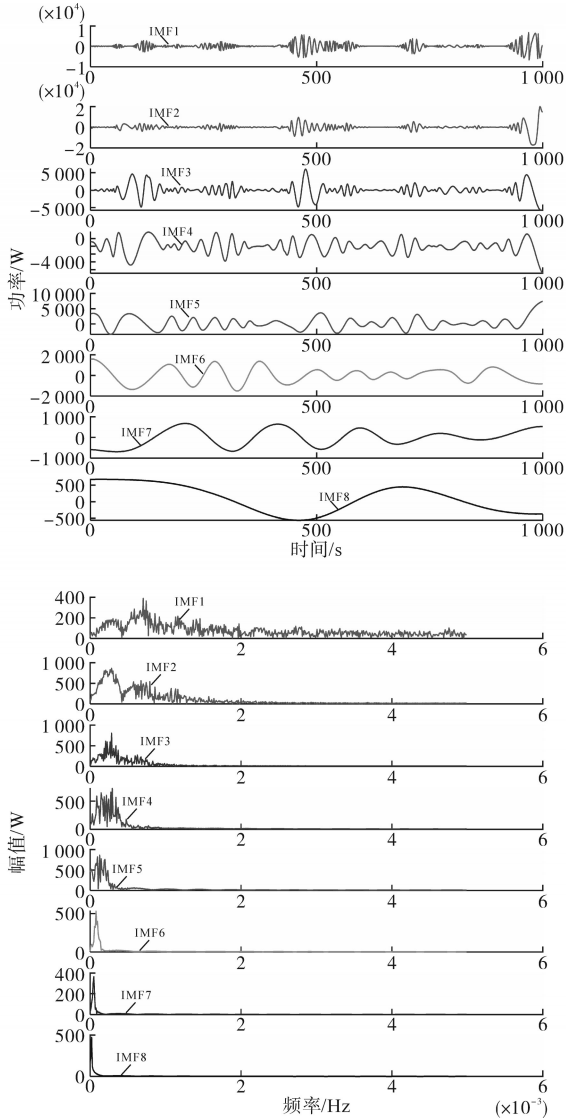


图 4 IMF 及其频谱

Fig.4 IMF and its spectrum

图 3 表明超级电容功率存在于全频段,LPF 截止频率取值不合理时会造成超级电容长时间过充过放,从而降低超级电容利用效率。

在原始信号不是纯噪声信号的情况下,EMD 容易产生模态混叠问题^[3]。图 4 表明,EMD 算法存在模态混叠现象,且各模态函数有明显的端点效应^[6]。

2.2 混合储能功率互补二次分配策略

为避免超级电容出现过充过放现象,在获得初级功率指令后,实时考虑超级电容的 SOC,提出基于超级电容 SOC 的功率互补控制策略,使得超级电容在临界充电期间减小充电电量,增加放电电量;临界放电期间减小放电电量,增加充电电量,极限充放电期间超级电容不动作(即限值管理);蓄电池承担功率互补调节作用。系统 P_{hess} 分配具体如表 2 所示。其中, P_{b1} , P_{sc1} 为功率互补控制下二次分配后的蓄电池和超级电容承担的功率; SOC_{sc} 为超级电容实时荷电状态,除以 100 表示化为百分比数,并参考相关文献对各运行区间进行合理划分^[8,10]。

表 2 功率分配

Tab.2 Power allocation

SOC_{sc} 运行区间	超级电容充放电	功率分配结果
正常运行 (25% 80%)	充/放电	$P_{\text{sc1}} = P_{\text{sc}}$ $P_{\text{b1}} = P_{\text{b}}$
临界充电 (80% 90%)	充电	$P_{\text{sc1}} = \text{SOC}_{\text{sc}} / 100 \times P_{\text{sc}}$ $P_{\text{b1}} = (1 - \text{SOC}_{\text{sc}} / 100) \times P_{\text{sc}} + P_{\text{b}}$
	放电	$P_{\text{sc1}} = (1 + \text{SOC}_{\text{sc}} / 100) \times P_{\text{sc}}$ $P_{\text{b1}} = P_{\text{b}} - \text{SOC}_{\text{sc}} / 100 \times P_{\text{sc}}$
极限充电 (90% 100%)	充电	$P_{\text{sc1}} = 0$ $P_{\text{b1}} = P_{\text{sc}} + P_{\text{b}}$
	放电	$P_{\text{sc1}} = (1 + \text{SOC}_{\text{sc}} / 100) \times P_{\text{sc}}$ $P_{\text{b1}} = P_{\text{b}} - \text{SOC}_{\text{sc}} / 100 \times P_{\text{sc}}$
临界放电 (20% 25%)	充电	$P_{\text{sc1}} = (1 + \text{SOC}_{\text{sc}} / 100) \times P_{\text{sc}}$ $P_{\text{b1}} = P_{\text{b}} - \text{SOC}_{\text{sc}} / 100 \times P_{\text{sc}}$
	放电	$P_{\text{sc1}} = (1 - \text{SOC}_{\text{sc}} / 100) \times P_{\text{sc}}$ $P_{\text{b1}} = P_{\text{b}} + \text{SOC}_{\text{sc}} / 100 \times P_{\text{sc}}$
极限放电 (0% 25%)	充电	$P_{\text{sc1}} = (1 + \text{SOC}_{\text{sc}} / 100) \times P_{\text{sc}}$ $P_{\text{b1}} = P_{\text{b}} - \text{SOC}_{\text{sc}} / 100 \times P_{\text{sc}}$
	放电	$P_{\text{sc1}} = 0$ $P_{\text{b1}} = P_{\text{sc}} + P_{\text{b}}$

3 算例分析

为验证本文提出的指数型函数惯性权重 PSO 参数优化 VMD 功率重构误差最小及基于超级电容 SOC 功率互补控制的二次功率分配的合理性,搭建了图 1 所示的孤立光储系统模型。系统模型中主要参数设置如下:蓄电池额定电压为 320 V、额定容量为 800 A·h、初始 SOC 为 50%;超级电容

额定电压为 300 V、额定容量为 600 F、初始电压为 200 V、等值电阻为 $2\ \Omega$ 。

3.1 不同函数惯性权重功率重构

PSO 参数优化 VMD 中,采用凹型、S 型函数惯性权重及指数型函数惯性权重条件下,获得的有利于 P_{hess} 进行 VMD 分解的 $[K, \alpha]$ 最优组合分别为 $[5, 2\ 443]$, $[4, 2\ 344]$, $[4, 3\ 265]$ 。

图 5 三种不同函数惯性权重功率重构局部放大对比曲线,其中凹型、S 型及指数型函数重构信号表示在对应最优组合下的功率重构曲线。结果表明,采用凹型函数与 S 型函数惯性权重重构信号曲线重合,重构信号与原始信号相差大;指数型函数惯性权重重构信号最接近于原始功率信号。

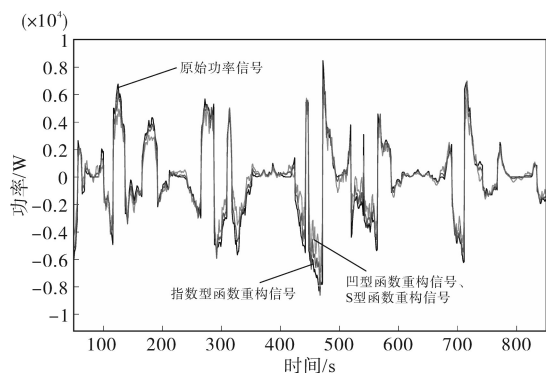


图 5 不同函数惯性权重功率重构对比曲线

Fig.5 Comparison curve of power reconstruction with different inertia weights

图 6 三种不同函数惯性权重重构功率信号与原始功率信号间差值曲线。

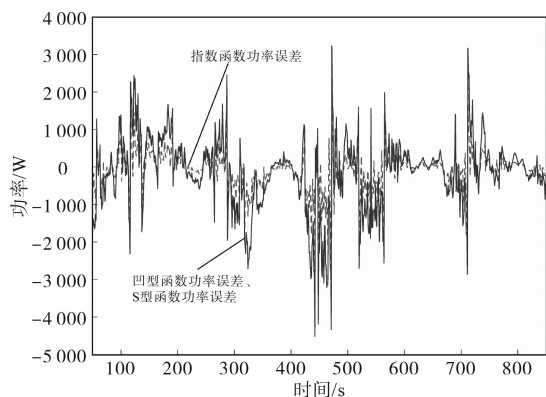


图 6 不同函数惯性权重功率重构误差对比曲线

Fig.6 Comparison curve of power reconstruction error with different function inertia weight

图 6 中,采用指数型函数参数优化结果其功率误差曲线波动变化幅度小;考虑到凹型与 S 型函数惯性权重条件下重构功率一致,即凹型、S 型函数功率误差曲线重合,波动幅度大。SMAPE 计算结果如下:采用凹型、S 型函数条件下功率误差为

30.5%,而指数型函数功率误差为 17.6%,计算误差降低 12.9%。上述分析表明,基于指数型函数 PSO 参数优化 VMD 能够使得重构功率误差降低,更加合理地将 P_{hess} 分配给混合储能系统。

3.2 指数型函数惯性权重 PSO 参数优化 VMD

基于以上分析,本文中 PSO 算法选择指数型函数惯性权重进行参数优化 VMD,分解结果如图 7 所示。依据混合储能功率承担特点^[20],取 IMF1 分量作为蓄电池承担的功率,IMF2~IMF4 分量作为超级电容承担的功率,即式(6)中 m 取 1, M 取 4。参数优化 VMD 算法与 LPF, EMD 算法结果相比, VMD 能够有效地将不同频段的功率信号进行分解,避免模态混叠和端点效应,降低经功率分配后所得的初级功率指令相邻频段对储能装置充放电状态的影响。

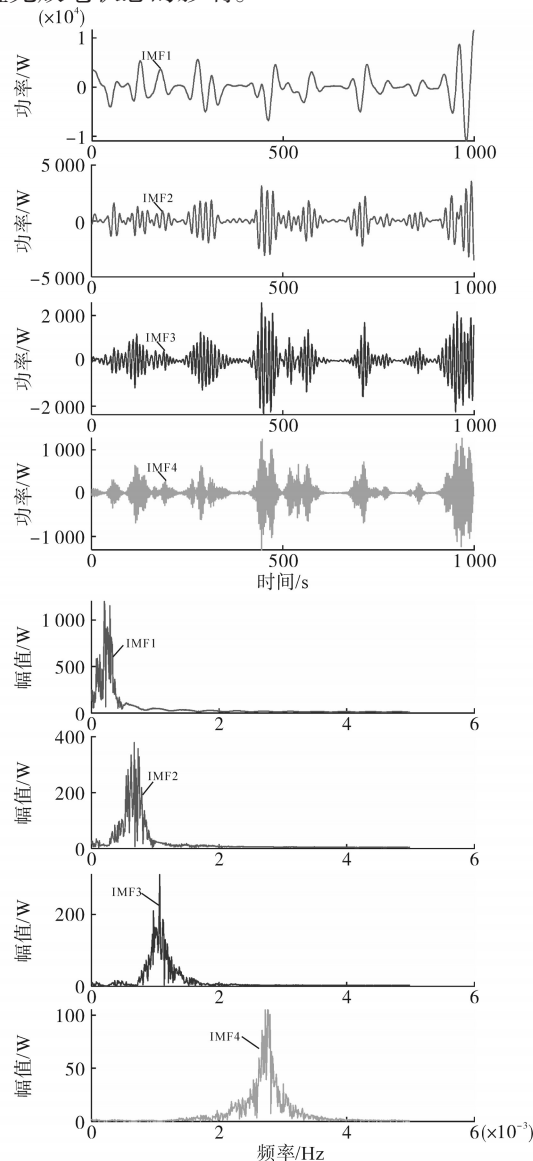


图 7 VMD 功率分解及频谱

Fig.7 Power decomposition and spectrum of VMD

3.3 混合储能功率互补二次分配

以超级电容 SOC 正常运行、临界充电及极限充电限值管理区间为例进行分析,超级电容 SOC 区间划分如图8所示^[8,10]。仿真结果表明,420 s前曲线重合,即超级电容 SOC 运行于正常区间,420 s后基于超级电容 SOC 的功率互补控制策略运行,其中,420~880 s表示临界充电期间,880~1 000 s表示极限充电限值管理期间。

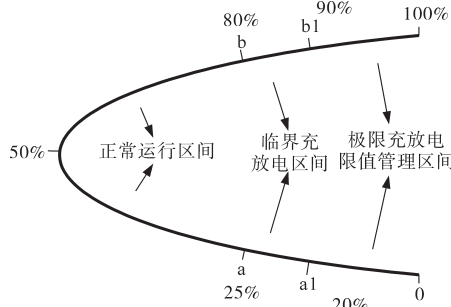


图8 超级电容荷电状态区间划分

Fig.8 Interval division of supercapacitor charging state

图9、图10为功率互补控制策略下混合储能功率分配局部放大对比图,两图对比表明,蓄电池在临界充电期间内多充电,故而减少超级电容充电电量;蓄电池放电电量减少,故而增加超级电容放电电量,实现减缓超级电容大幅度充电的目标。

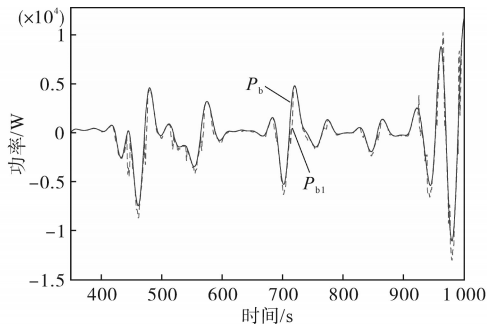


图9 蓄电池功率互补控制放大图

Fig.9 Enlarged diagram of battery power complementary control

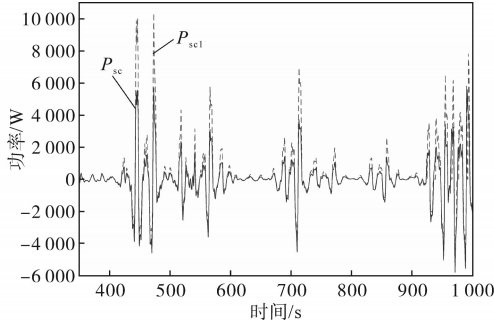


图10 超级电容功率互补控制放大图

Fig.10 Enlarged diagram of super capacitor power complementary control

图9中900~1 000 s运行期间,出现部分 $P_{b1} > P_b$ 短暂区间(极限充电),主要因为功率互补控制只能延缓超级电容继续充电速度,当超级电容仍不

断充电,其 SOC 将跃至极限充电限值管理区间,超级电容不动作,全部 P_{hess} 由蓄电池承担;曲线对比如图11、图12所示,图11虚线框内表明存在 $P_{b1} > P_b$,对应于图12虚线框内超级电容不动作(即 $P_{sc1} = 0$)。

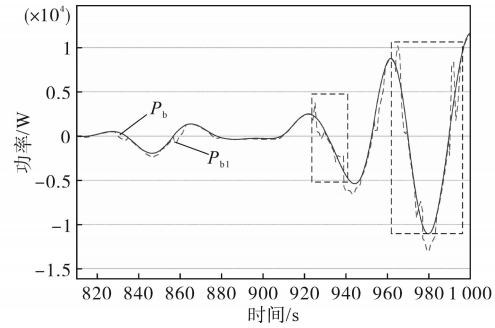


图11 蓄电池功率互补控制放大图

Fig.11 Enlarged diagram of battery power complementary control

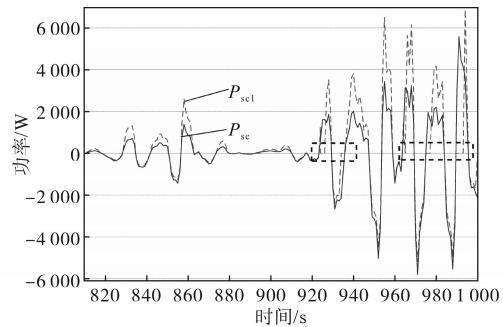


图12 超级电容功率互补控制放大图

Fig.12 Enlarged view of supercapacitor power complementary control

图13、图14为在功率互补控制下混合储能 SOC 对比曲线,其中 $IPSOC_{sc}$ 、 $IPSOC_b$ 分别表示功率互补控制后超级电容和蓄电池 SOC 曲线; SOC_{sc} 、 SOC_b 分别表示未采用功率互补控制混合储能 SOC 曲线。

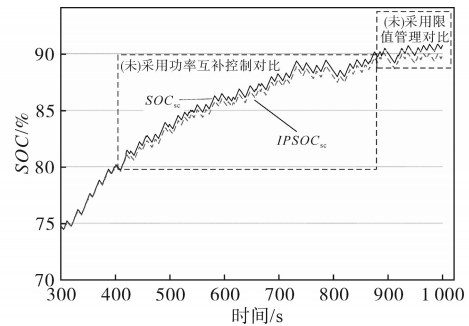


图13 超级电容荷电状态局部放大曲线

Fig.13 Local amplification curves of supercapacitor under charge state

图13中420~880 s内表示超级电容 SOC 处于临界充电区间,超级电容 SOC 在功率互补控制期间增长趋势相对变缓;880~1 000 s内表明当

超级电容SOC达到极限充电限值管理区间时,限值管理未出现过充现象,维持超级电容SOC在临界充电区域。剩余高频功率由蓄电池承担,功率总量相对增加,故图14中蓄电池SOC相对增大。本文已验证临界放电及下限限值管理的正确性,不再赘述。

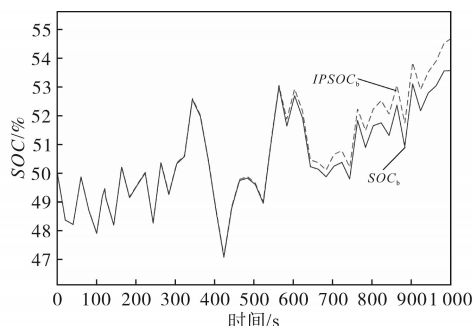


图14 蓄电池荷电状态对比曲线

Fig.14 Comparison curves of battery charge state

4 结论

本文提出采用指数型函数惯性权重 PSO 参数优化 VMD 算法,对混合储能系统剩余功率进行初次功率分配,减小功率重构误差;为缓解超级电容 SOC 变化趋势,避免过充过放现象,提出了基于超级电容 SOC 的功率互补控制策略,通过对比验证了所提方法的有效性。得出以下结论:1)通过与 PSO 参数优化 VMD 算法中采用的 S 型函数及凹型函数惯性权重功率信号重构对比,表明提出的采用指数型函数惯性权重 PSO 参数优化 VMD 算法中,在获得 $[K, \alpha]$ 最优组合后,使得重构功率与原始功率最接近,重构误差小;SMAPE 计算误差降低 12.9%,保证了混合储能系统初次功率的合理分配;2)提出的基于超级电容 SOC 功率互补控制策略,使得超级电容在临界运行期间其 SOC 变化幅度变缓;达到极限充放电期间进行限值管理,避免过充过放,延长超级电容使用寿命。

参考文献

- [1] 陈恒安,管霖,卢操,等. 新能源发电为主电源的独立微网多目标优化调度模型和算法[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 664-672.
CHEN Hengan, GUAN Lin, LU Cao, et al. Multi-objective optimal dispatch model and its algorithm in isolated microgrid with renewable energy generation as main power supply[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 664-672.
- [2] 李亚楠,王倩,宋文峰,等. 混合储能系统平滑风电出力的变分模态分解-模糊控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 58-65.

- LI Yanan, WANG Qian, SONG Wenfeng, et al. Variational mode decomposition and fuzzy control strategy of hybrid energy for smoothing wind power outputs[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 58-65.
- [3] 郭玲娟,魏斌,韩肖清,等. 基于集合经验模态分解的交直流混合微电网混合储能容量优化配置[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 527-537.
GUO Lingjuan, WEI Bin, HAN Xiaoqing, et al. Capacity optimal configuration of hybrid energy storage in hybrid AC/DC micro-grid based on ensemble empirical mode decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 527-537.
- [4] 孙玉树,李星,唐西胜,等. 应用于微网的多类型储能多级控制策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 181-188.
SUN Yushu, LI Xing, TANG Xisheng, et al. Multi-level control strategy of multi-type energy storages for microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 181-188.
- [5] 王利猛,刘久成,田春光,等. 基于统计学方法的微网混合储能容量优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 187-194.
WANG Limeng, LIU Jiucheng, TIAN Chunguang, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage in microgrid based on statistic method[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 187-194.
- [6] 孙承晨,袁越,CHOI San Shing,等. 基于经验模态分解和神经网络的微网混合储能容量优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 19-26.
SUN Chengchen, YUAN Yue, CHOI San Shing, et al. Capacity optimization of hybrid energy systems in microgrid using empirical model decomposition and neural network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 19-26.
- [7] 吴杰,丁明. 采用自适应小波包分解的混合储能平抑风电波动控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 7-12.
WU Jie, DING Ming. Wind power fluctuation smoothing strategy of hybrid energy storage system using self-adaptive wavelet packet decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 7-12.
- [8] 李培强,李文英,唐捷,等. 基于 SOC 优化的混合储能平抑风电波动方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(3): 20-27.
LI Peiqiang, LI Wenying, TANG Jie, et al. Method of hybrid energy storage to smooth the fluctuations for wind power based on state of charge optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(3): 20-27.
- [9] 徐艳春,高永康,李振兴,等. 基于 VMD 初始化 S 变换的混合动力系统电能质量扰动检测与分类[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4786-4798.
XU Yanchun, GAO Yongkang, LI Zhenxing, et al. Power quality disturbance detection and classification of hybrid power system based on VMD initialization S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4786-4798.
- [10] 颜晨煜,樊艳芳,姚波. 采用自适应变分模态分解的混合储能平滑光伏出力波动控制策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1898-1960.

- YAN Chenyu, FAN Yanfang, YAO Bo. Strategy for smoothing photovoltaic power fluctuation of hybrid energy storage system using self-adaptive variational mode decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1898-1960.
- [11] 施杰, 伍星, 柳小勤, 等. 变分模态分解结合深度迁移学习诊断机械故障[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 129-137.
- Shi Jie, WU Xing, LIU Xiaoqin, et al. Mechanical fault diagnosis based on variational mode decomposition combined with deep transfer learning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(14): 129-137.
- [12] 杜佳耘, 雷勇, 李永凯, 等. 基于参数优化变分模态分解的混合储能功率分配策略[J]. 现代电力, 2021, 38(1): 51-59.
- DU Jiayun, LEI Yong, LI Yongkai, et al. Hybrid energy storage strategy based on parameter optimized variational mode decomposition[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(1): 51-59.
- [13] 刘明宇, 姚芳, 李志刚, 等. 风电机组功率模型参数辨识及风资源利用率评估[J]. 太阳能学报, 2020, 41(12): 305-315.
- LIU Mingyu, YAO Fang, LI Zhigang, et al. Power model parameter identification and wind resource utilization evaluation of wind turbine[J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(12): 305-315.
- [14] 张旭辉, 林海军, 刘明珠, 等. 基于蚁群粒子群优化的卡尔曼滤波算法模型参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 44-50.
- ZHANG Xuhui, LIN Haijun, LIU Mingzhu, et al. Model parameter identification of UKF based on ACO-PSO[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 44-50.
- [15] 殷丽娟, 赵熙临, 梅真. 基于混沌粒子群优化算法的微电网优化运行技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(5): 55-61.
- YIN Lijuan, ZHAO Xilin, MEI Zhen. Optimizing technology for microgrid operation based on chaos particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(5): 55-61.
- [16] 李奇, 赵淑丹, 蒲雨辰, 等. 考虑电氢耦合的混合储能微电网容量配置优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 486-495.
- LI Qi, ZHAO Shudan, PU Yuchen, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage microgrid considering electricity-hydrogen coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 486-495.
- [17] 刘忠, 杨陈, 蒋玮, 等. 基于一致性算法的直流微电网储能系统功率分配技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 61-69.
- LIU Zhong, YANG Chen, JIANG Wei, et al. Consensus algorithm based power distribution technology for storage system in DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 61-69.
- [18] 杨子龙, 宋振浩, 潘静, 等. 分布式光伏/储能系统多运行模式协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2213-2220.
- YANG Zilong, SONG Zhenhao, PAN Jing, et al. Multi-mode coordinated control strategy of distributed PV and energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2213-2220.
- [19] GAMAGE D, ZHANG X, UKIL A. Fuzzy logic controller for efficient energy management of a PV system with HESS[C]// Washington DC, IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2018: 3556-3561.
- [20] BARTON J P, INFELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 19(2): 441-448.
- 收稿日期: 2021-11-11
修改稿日期: 2021-12-31
- YIN Lijuan, ZHAO Xilin, MEI Zhen. Optimizing technology for microgrid operation based on chaos particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(5): 55-61.
- ~~~~~
(上接第 16 页)
- [7] 范冬冬. 新型隔离三端口拓扑及控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- FAN Dongdong. Research on the new isolated three-port-converter and control strategy[D]. Harbin: Harbin Institute of University, 2020.
- [8] 李微, 周雪松, 马幼捷, 等. 三端口直流微电网母线电压控制器及多目标控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 92-102.
- LI Wei, ZHOU Xuesong, MA Youjie, et al. Three-port DC microgrid bus voltage controller and multi-objective control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 92-102.
- [9] 冯兴田, 陶媛媛, 孙添添, 等. 基于储能的多端口电源系统能量管理与控制策略[J]. 电力系统及其自动化, 2018, 40(4): 66-69.
- FENG Xingtian, TAO Yuanyuan, SUN Tiantian, et al. Energy management and control strategy for multiport power supply systems based on energy storage [J]. Power System & Automation, 2018, 40(4): 66-69.
- [10] 齐贤斌. 用于光储系统的三端口电源变换器及其控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- QI Xianbin. Research on the three-port power converter and its control strategy for photovoltaic and storage[D]. Harbin: Harbin Institute of University, 2019.
- [11] 温兆伦. 用于光储系统的三端口变换器及多峰值 MPPT 研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- WEN Zhaolun. Research on the three-port power converter and multi-peak MPPT for photovoltaic and storage[D]. Harbin: Harbin Institute of University, 2020.
- [12] 邓凯, 赵伟, 罗敏, 等. 适用于光储充直流微网的绿色高效电力变换器[J]. 电气传动, 2020, 50(9): 42-71.
- DENG Kai, ZHAO Wei, LUO Min, et al. Power converter with green converting and high efficiency for PV-storage-charging DC micro grid[J]. Electric Drive, 2020, 50(9): 42-71.
- [13] 郁家麟, 肖龙海, 胡舟, 等. 面向微电网集群的多端口能量路由及其分布式控制策略[J]. 电气传动, 2021, 51(13): 46-51.
- YU Jialin, XIAO Longhai, HU Zhou, et al. Multi-terminal energy router and its distributed control strategy for micro-grid clusters[J]. Electric Drive, 2021, 51(13): 46-51.
- 收稿日期: 2022-01-06
修改稿日期: 2022-02-15