用于平抑间歇性负荷的混合储能系统优化分频定容技术

任 凯1,蒋 玮1,杨 波1,2,桑丙玉2,刘 忠3,李培培3

(1. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;2. 中国电力科学研究院有限公司(南京),江苏 南京 210003;3. 国网江苏省电力有限公司扬州供电分公司,江苏 扬州 225000)

摘要:配电网中鱼塘、水泵等间歇性负荷导致的功率峰谷相差10倍左右,影响配电网的安全运行。含功率型 储能器件与能量型储能器件的混合储能系统(HESS)可以用于平抑间歇性负荷功率波动。为此,重点研究了 HESS设计过程中的分频定容技术:采用经验模态分解与希尔伯特频谱变换相结合的方法,对间歇性负荷特 性进行频域分析;根据能量混叠最少原则,确定间歇性负荷中分别由超级电容器和蓄电池响应的部分;在储 能元件充放电约束条件下确定 HESS 的额定功率与额定容量;建立包含容量成本和功率成本的 HESS 分频定 容优化模型,并采用遗传算法进行优化,确定 HESS 的容量优化配置。基于实际算例进行仿真分析,结果验证 了所提方法的有效性。

0 引言

配电网具有分布广泛、构成复杂、影响面广等特点,其供电能力、供电可靠性和供电质量对经济社会的影响巨大。配电网中的间歇性负荷对供电质量和 可靠性的影响较大^[1]。以使用单相增氧泵的"鱼塘 养殖"集中区为例,在夏季增氧高峰期,尖峰负荷会 在每日午间短时出现,功率峰谷相差10倍左右,配 电变压器的负载率峰值高达100%~130%,严重影 响了设备的正常安全供电。仅江苏扬州供电公司供 电范围内存在此类间歇性负荷的配电变压器就超过 650台。由于间歇性负荷的持续时间短,通过设备 增容提高供电安全性的成本高、投资回报比低。因 此,亟需寻找新途径解决配电网中间歇性负荷所带 来的问题。

储能系统在电网削峰填谷、新能源接入、电能质 量改善和应急电源等方面发挥着积极的作用^[24]。 应用储能技术已成为提升配电网供电能力和供电可 靠性的有效手段^[56]。目前应用于配电网中的大多 为蓄电池、锂电池等能量型电化学储能设备,其具有 能量密度大、功率密度小的特点,使用寿命受充放电 次数限制,对间歇性负荷的高频波动部分响应能力

收稿日期:2020-10-30;修回日期:2021-02-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877041);国网江苏 省电力有限公司科技项目(分布式储能提升"鱼塘养殖"区含 间歇性负荷配电网运行能力关键技术研究)(B442NY190005) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877041) and the Science and Technology Program of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.(Research on Key Technology of Distributed Energy Storage to Improve Operation Capacity of Distribution Network with Intermittent Load in "Fish Pond Farming" Area)(B442NY190005) 差^[7-8]。但如果利用具有快速响应能力和高峰值功 率的超级电容器等功率型储能设备响应高频波动, 又会增加储能系统的体积和成本^[9-11]。

混合储能系统HESS(Hybrid Energy Storage System)可以有效地将2种储能的优势相结合,利用能 量型储能、功率型储能分别平抑高能量低频功率波 动、低能量高频率功率波动。研究结果表明,HESS 能够提高电能使用效率,延长储能设备寿命,且能更 好地维持系统的稳定运行^[12]。当将HESS应用于平 抑配电网中的间歇性功率时,系统参数的优化设计 与负荷特性和配电网结构密切相关,合理地进行能 量型、功率型储能的分频定容将可以有效地提升平 抑效果以及降低系统投资成本。

关于HESS中能量型和功率型储能元件的功率 分配及优化设计技术已有较多的研究成果。文献 [13]提出了将频谱分析和低通滤波相结合用于平滑 新能源输出波动的储能优化配置方法,在频率波动 范围内确定最佳的一阶低通滤波器的截止频率,从 而确定满足需求的最优储能额定功率和容量,然而 低通滤波器在滤波的过程中会产生延迟,造成储能 优化容量偏高。文献[14]采用小波包分解理论对平 抑可再生能源出力波动的 HESS 的容量进行配置, 然而小波包分解需要提前确定基波,基波选择的不 同将导致小波分解所得的分量产生变化,且该方法 会在信号重构的过程中引入误差。文献[15]针对风 光互补独立微电网系统,考虑储能设备的运行特性 对其循环使用寿命的影响,研究了微电网中储能的 容量优化配置方法。文献[16]以蓄电池为研究载 体,在保证输出功率波动性较小的前提下,以总经济 成本最小为目标,以容量限制、功率限制、充放电次 数限制为约束,对储能系统的容量进行优化。文献 [17]提出基于集合经验模态分解 EMD (Empirical Mode Decomposition)的交直流混合微电网中 HESS 的容量优化配置模型,确定了系统年综合成本最小的滤波阶数及对应的 HESS 优化配置方案。

综上所述,目前配电网中有关HESS的设计和 控制技术的研究主要针对平抑光伏接入引起的功率 波动,而针对间歇性负荷平抑的研究成果较少。同 时,对高、低频功率分解算法的研究主要针对控制而 非设计过程。因此,面向HESS的优化设计,本文提 出了一种HESS用于平抑间歇性负荷的分频定容技 术。首先,采用EMD与希尔伯特频谱变换相结合的 方法,对间歇性负荷造成的功率缺额进行高、低频分 解,高、低频分量分别由超级电容器、蓄电池进行平 抑;其次,根据模态能量混叠最少原则,确定分频频 率,在各种约束条件下确定HESS的容量;然后,综 合考虑HESS的容量成本与功率成本,采用遗传算 法对HESS进行配置优化;最后,基于某"鱼塘养殖" 区域含间歇性负荷的真实数据对本文所提方法进行 仿真验证。

1 基于 EMD 与希尔伯特频谱变换的间歇性 负荷建模

1.1 HESS用于平抑间歇性负荷

某"鱼塘养殖"区主变压器夏季单日的有功功率 变化曲线见附录中图 A1。夏季午间为鱼塘增氧高 峰时段,大量的增氧泵同时接入电网,造成午间尖峰 负荷,使得配电变压器的负载率较高,影响了设备的 效率和安全性,同时可能会导致低电压等电能质量 问题。图 A1 所示的配电网主变压器有功功率曲线 反映了同一台区中所有间歇性负荷的总体变化。同 一台区中不同分支线路上的间歇性负荷在空间上分 布不同,每条分支的间歇性负荷所占比重也不同,所 以对配电网电压造成的影响就会不同。针对间歇性 负荷峰谷差大引起的线路过载或供电能力不足问 题,可采用由超级电容和蓄电池组成的 HESS 进行 平抑,系统结构如图1所示。图中,P₆为台区配电变







压器的额定功率; P_{HESS} 为HESS的总输出功率; P_{L} 为间歇性负荷功率需求。

为了避免 HESS 频繁充放电,以变压器负载率 为70%为界限,当变压器负载率不高于70%时, HESS 处于待机状态,所有负荷由配电网提供;当变 压器负载率高于70%时,HESS 开始工作。定义配 电变压器额定功率的70%与负荷功率需求 P_L 之差 ΔP 为功率缺额,即 ΔP =70% $P_C - P_L$,当 $\Delta P \ge 0$ 时,储 能系统处于充电状态;当 $\Delta P < 0$ 时,储能系统处于放 电状态。

1.2 基于EMD与希尔伯特频谱变换的频率分解

由于 HESS 中的 2 种储能元件对不同频率功率 的响应能力不同,在进行 HESS 设计时,需要对 ΔP 进行频域分析,根据典型波动性负荷曲线的频率分 解结果进行储能系统的参数设计,使 HESS 中的蓄 电池和超级电容器具有足够的容量和功率响应间歇 性负荷。

由于间歇性负荷具有非线性、非平稳的特性,本 文选用EMD对 ΔP 进行频域分解,将 ΔP 分为高频功 率与低频功率。EMD算法的可靠性高,可以对非平 稳、非线性信号进行分析,与传统小波分析相比,其 无需先验信息,精确度较高^[18-20]。

EMD 算法根据不同的时间尺度特征将初始信 号 $\Delta P(t)$ 分解成一系列固有模态函数 IMF(Intrinsic Mode Function),如式(1)所示。

$$\Delta P(t) = \sum f_{\text{IMF}i} + r \tag{1}$$

其中, f_{IMFi}为第*i*阶 IMF; r为余量, 反映功率缺额的变 化趋势。

采用 EMD 算法进行功率频率分解的具体步骤 如下。

(1)确定原始序列X(t)的所有局部最大值和局 部最小值,用三次样条函数进行插值,得到上包络线 $e_{\max}(t)$ 和下包络线 $e_{\min}(t)$,求二者的均值得到包络平 均曲线 $m_1(t)$ 。

(2)用原始序列X(t)减去包络平均曲线m₁(t),得到类距平值序列h₁(t),如式(2)所示。

$$h_1(t) = X(t) - m_1(t)$$
 (2)

(3)判断h₁(t)是否满足以下2个IMF成立条件:
 a.局部极值点个数和过零点个数相等,或两者

相差1; b. 在任意时间点,局部极大值的包络(上包络

线)和局部极小值的包络(下包络线)的平均值必须为0。

若不满足上述成立条件,则将 $h_1(t)$ 看作新的 X(t),重复步骤(1)和步骤(2),直到 $h_1(t)$ 满足IMF成 立的条件,则将 $h_1(t)$ 看作分解所得的第1阶IMF。

(4)从信号X(t)中分离出IMF分量 $h_1(t)$,得:

 $r_1(t)=X(t)-h_1(t)$ (3) (5)对所得新的信号重复步骤(1)—(4),分解出 新的IMF分量,如式(14)所示。

$$\begin{cases} r_{2}(t) = r_{1}(t) - h_{2}(t) \\ r_{3}(t) = r_{2}(t) - h_{3}(t) \\ \vdots \\ r_{n}(t) = r_{n-1}(t) - h_{n}(t) \end{cases}$$
(4)

其中,n为IMF的最大阶数。

(6)若满足以下条件之一,则分解过程结束:

a. $r_n(t)$ 或 $h_n(t)$ 小于给定值;

b. $r_n(t)$ 为单调函数,不可能再从中筛分出IMF。 将所有的IMF和余项相累加,可得到:

$$X(t) = \sum_{i=1}^{n} h_i(t) + r_n(t)$$
(5)

对于某个含间歇性负荷的配电网,假设负荷所 处的配电变压器额定功率 $P_c=10$ MV·A,则需补偿的 功率缺额 ΔP 如附录中图 A2(a)所示, ΔP 经过 EMD 算法分解后,结果如附录中图 A2(b)所示。通过 EMD 算法分解得到的各阶 IMF($f_{IMF1} - f_{IMF5}$)具有明 确的物理意义,每一阶 IMF 均是 ΔP 的一种振荡模 式。在 EMD 算法的基础上,进一步利用希尔伯特频 谱变换可以得到 f_{IMFi} 的瞬时频率-时间曲线 $c_i(t)$, $c_i(t) 反映的是 f_{IMFi}$ 在每个时刻能量的变化情况,因 此 $c_i(t)$ 能够描述功率波动的大小。采用希尔伯特频 谱变换将原始信号与一个固定信号h(t)做卷积。设 原始信号为实函数信号x(t),固定信号如式(6)所示。

$$h(t) = 1/(\pi t) \tag{6}$$

则希尔伯特频谱变换H[x(t)]的表达式为:

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau$$
(7)

原始信号经过希尔伯特频谱变换后得到的频 率-时间-功率的三维关系如附录中图A3所示。将 三维关系图中频率与时间的关系映射到频域,得到 瞬时频率-时间关系图如图2所示(图中频率为标幺 值)。ΔP经过EMD算法分解后得到*f*_{IMFi},再经过希 尔伯特频谱变换得到IMF的瞬时频率-时间曲线 *c_i(t)*,将*c_i(t)*作为功率分频分解的基础。





由于配电网系统的有功功率一直处于波动状

态,当低频小功率波动出现时,蓄电池足以在短时间 内平抑该功率波动。超级电容器主要用于平抑间歇 性的高频大功率波动。为了减少超级电容器的频繁 响应,提升 HESS 平抑负荷波动的效率,延长系统的 使用时间,本文针对 ΔP 设定一个平抑阈值 λ ,当 $|\Delta P| < \lambda$ 时,仅由蓄电池进行功率补偿,超级电容器 不工作;当 $|\Delta P| \ge \lambda$ 时,由蓄电池和超级电容器同时 提供功率进行补偿。本文设定平抑阈值 $\lambda = 5 % P_{co}$

1.3 高、低频功率分量分界点的确定

在 HESS 中,由超级电容器和蓄电池分别对 ΔP 的高、低频分量进行补偿,因此需要将得到的频率分解结果进一步定义为高频和低频分量。

高、低频功率分解的最理想状态是每一个瞬时 频率-时间曲线完全精确分离,但实际情况下很难实 现各曲线的精确分离,相邻的曲线或多或少存在混 合重叠的情况,因此必须确定一个高、低频功率分量 的分界点频率,使得各个模态能量混叠最少,使2种 储能元件都能处于合适的工作区间。

此时确定的分频频率必定与2条相邻的瞬时频 率-时间曲线有相交的情况,这2条相邻曲线为距离 分频频率c"最近的2条曲线,其中一条曲线大部分 频率高于分频频率,另一条曲线大部分频率低于分 频频率。因此设与c。相交的相邻2条瞬时频率-时 间曲线分别为c_i(t)(大部分曲线位于分频频率之上) $和 c_{i+1}(t)$ (大部分曲线位于分频频率之下),对应的 IMF 分别为 $f_{\text{IMF}i}$, $f_{\text{IMF}i+1}$ 。因为曲线 $c_i(t)$ 的大部分频 率高于分频频率cg,满足分频的最初目标(即确定高 频功率范围),低于分频频率cg的部分为不理想状 态,应作为能量混叠优化中关注的重点。同理,曲线 $c_{i+1}(t)$ 的大部分频率低于分频频率 c_{g_i} ,满足分频的最 初目标(即确定低频功率范围),高于分频频率c。部 分为不理想状态,应作为能量混叠优化中关注的重 点。因此,对于同一条频率-时间曲线,根据曲线与 分频频率的相对位置,若大部分曲线高于分频频率, 能量混叠则关注其低于分频频率部分的曲线;若大 部分曲线低于分频频率,能量混叠则关注其高于分 频频率部分的曲线。因此设 $c_i(t)$ 低于 c_{g_i} 的时段为 t_j $(j=1,2,\cdots,m), c_{i+1}(t)$ 高于 c_{s_i} 的时段为 $t_k(k=1,2,\cdots,m)$ s)。根据能量混叠最少的原则,需要确定分频频率 c_{st},使得与其相邻的2条曲线的能量混叠最少。设 混合叠加的能量为E_d,则确定分频频率的过程可以 视为一个优化的过程,即以每一个频率所确定的混 合叠加的能量绝对值之和最小为优化目标函数,如 式(8)所示。

$$E_{d,i} = \sum_{j=1}^{m} \left| f_{\text{IMF}i}(t_j) \right| \Delta t + \sum_{k=1}^{s} \left| f_{\text{IMF}i+1}(t_k) \right| \Delta t$$
(8)

其中, Δt 为采样过程中的最小时间间隔。当 $E_{d,i}$ 取 得最小值时,即可确定分频频率 c_{g_i} 。以分频频率 c_{g_i} 、 为分界点将曲线 $c_i(t)$ 划分为高频分量和低频分量, 即将功率缺额 ΔP 分解为高频功率 P_{high} 和低频功率 P_{low} ,如式(9)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{high}} = c_1 + c_2 + \dots + c_{g_f} \\ P_{\text{low}} = c_{g_f+1} + c_{g_f+2} + \dots + c_{f,\min} + r \end{cases}$$
(9)

其中,c_{f,min}为最低频率分量。

利用上述高、低频分量分解方法,可以分别生成 超级电容器和蓄电池的功率指令,实现间歇性负荷 波动功率在不同储能元件中的合理分配,具体分配 策略如图3所示。图中, $E_{c}(t)$ 、 $E_{b}(t)$ 分别为超级电容 器、蓄电池在t时刻的电量; E_{cmin} 、 E_{cmax} 分别为超级电 容器的最小、最大电量; E_{b,min}、E_{b,max}分别为蓄电池的 最小、最大电量; $P_{e}(t)$ 、 P_{er} 分别为超级电容器在t时 刻的输出功率、额定功率;P_b(t)、P_{br}分别为蓄电池在 *t*时刻的输出功率、额定功率。当 $|\Delta P| ≥ \lambda$ 时, HESS 开始工作,由蓄电池和超级电容器同时提供功率补 偿。蓄电池平抑低频功率,超级电容器平抑高频功 率。功率缺额 ΔP 经过 EMD 算法,根据不同时间尺 度特征将初始信号分解成一系列 fmr 和余量 r。在 利用 EMD 算法进行时域分解时, 功率缺额 ΔP 包括 余量r,余量r反映功率缺额的变化趋势,本文默认其 是一个低频分量,因此在下一阶段利用希尔伯特变 换进行频域变换时,如图4所示,将功率缺额 ΔP 减 去余量r,得到各fmi所对应的瞬时功率-时间曲线 $c_i(t)$,根据能量混叠最少原则确定分频频率后,将瞬 时功率--时间曲线 c_i(t) 分为高频部分和低频部分, 此 时需要默认将余量r加入低频部分,只是省略了余 量的频域分解步骤,并没有改变其低频的性质。



图3 平抑间歇性负荷的功率分配策略

Fig.3 Power allocation strategy for suppressing intermittent load

2 HESS的分频定容

2.1 HESS额定功率的优化设计

确定间歇性负荷高、低频功率分量的分界点后, 在 HESS 的控制过程中,低频功率分量由蓄电池响 应,高频功率分量由超级电容器响应,即 $P_{\text{HESS,b}}=P_{\text{low}}$, $P_{\text{HESS,c}}=P_{\text{high}\circ}$

设HESS中蓄电池的额定功率为 $P_{b,r}$,如果在t时刻储能的功率需求为 $P_{HESS,b}(t)$,配置 $P_{b,r}$ 应能够吸收或补充 $P_{HESS,b}(t)$ 在采样时段T内出现的最大过剩功率或最大缺额功率,考虑变流器的效率和储能元件的充放电效率,可得:

$$P_{\mathrm{b,r}} = \max\left\{ \left| \max_{t \in (t_0, t_0 + T)} \left\{ P_{\mathrm{HESS,b}}(t) \right\} \right| \eta_{\mathrm{DC/DC}} \eta_{\mathrm{DC/AC}} \eta_{\mathrm{c}}, \\ \left| \min_{t \in (t_0, t_0 + T)} \left\{ P_{\mathrm{HESS,b}}(t) \right\} \right| / (\eta_{\mathrm{DC/DC}} \eta_{\mathrm{DC/AC}} \eta_{\mathrm{d}}) \right\}$$
(10)

其中, t_0 为初始时刻; $\eta_{DC/DC}$ 、 $\eta_{DC/AC}$ 分别为DC/DC变换器、DC/AC变流器的效率; η_c 、 η_d 分别为蓄电池的充电、放电效率。同理可求得超级电容器的额定功率 P_{c,r_0}

2.2 HESS额定容量的优化设计

设 HESS 中蓄电池的额定容量为 $E_{b,r}$ 。储能元件的荷电状态 SOC(State Of Charge)用 S_{soc} 表示,表示 在某一时刻储能的剩余电量与其额定容量之比。 设蓄电池充电和放电至截止电压时的 SOC 分别为1 和 0,初始 SOC 为 $S_{b,soc,0}$, SOC 允许范围为[$S_{b,soc,min}$, $S_{b,soc,max}$],则t时刻蓄电池的 SOC $S_{b,soc}(t)$ 为:

$$S_{\rm b,SOC}(t) = S_{\rm b,SOC,0} + \frac{\int_{0}^{t\Delta t} P_{\rm ess,b}(\tau) d\tau}{E_{\rm b,r}}$$
(11)

其中, ΔT 为储能元件功率指令间隔; $P_{\text{ess,b}}(\tau)$ 为考虑 变流器效率、充放电效率后的功率参考值,见式(12)。

$$P_{\text{ess,b}}(t) = \begin{cases} P_{\text{HESS,b}}(t) \eta_{\text{DC/DC}} \eta_{\text{DC/AC}} \eta_{\text{c}} & P_{\text{HESS,b}}(t) > 0 \\ P_{\text{HESS,b}}(t) / (\eta_{\text{DC/DC}} \eta_{\text{DC/AC}} \eta_{\text{d}}) & P_{\text{HESS,b}}(t) \le 0 \end{cases} (12)$$

由于蓄电池要满足SOC约束,即 $S_{b,SOC,min} \leq S_{b,SOC}(t) \leq S_{b,SOC,max}$,则可以根据式(13)得到蓄电池的额定容量。

$$E_{\rm b,r} \ge \max\left\{\frac{\max\int_{0}^{t\Delta T} P_{\rm ess,b}(\tau) d\tau}{S_{\rm b,SOC,max} - S_{\rm b,SOC,0}}, \frac{-\min\int_{0}^{t\Delta T} P_{\rm ess,b}(\tau) d\tau}{S_{\rm b,SOC,0} - S_{\rm b,SOC,min}}\right\}$$
(13)

同理可求得超级电容器的额定容量 E_{c,r}。

3 算例仿真验证

3.1 算例及参数

以江苏省扬州市"鱼塘养殖"区域为例,其馈线 拓扑结构如附录中图A4所示。该区域主变夏季某日 的有功功率变化曲线如附录中图A1所示,午间存在 尖峰负荷,采样时间间隔为1min,主变压器的额定 容量为10MV·A。HESS的相关参数见附录中表A1。

HESS的初始成本包括储能容量成本和储能功率成本,是HESS成本的主要部分,因此需要对系统

的初始成本进行优化。在确定蓄电池和超级电容器的额定功率和额定容量后,可以确定 HESS 的初始 投资成本 C_0 及 HESS 的年运维成本 C_3 ,将初始投资 成本与年运维成本之和作为 HESS 容量配置的优化 目标,如式(14)所示。

$$C = C_0 + C_3 \tag{14}$$

$$C_{0} = C_{1} + C_{2} = K_{1}P_{b,r} + K_{2}P_{c,r} + K_{3}E_{b,r} + K_{4}E_{c,r}$$
(15)
$$C_{3} = K_{5}E_{b,r} + K_{6}E_{c,r}$$
(16)

其中,C为HESS的投资运行总成本;C₁、C₂分别为 HESS的功率投资、容量投资成本;K₁、K₂分别为蓄电 池、超级电容器的单位功率投资成本;K₃、K₄分别为 蓄电池、超级电容器的单位容量投资成本;K₅、K₆分 别为蓄电池、超级电容器的单位容量年运维成本。 采用遗传算法对目标函数进行优化求解,求解流程 见附录中图A5。利用遗传算法进行优化需满足以 下约束条件。

(1) 蓄电池的约束条件。

$$\begin{cases} \left| P_{b}(t) \right| \leq P_{b,r} \\ E_{b,\min} \leq E_{b}(t) \leq E_{b,\max} \\ S_{i} = c_{i} \leq S_{i} = c_{i}(t) \leq S_{i} = c_{i}(t) \end{cases}$$
(17)

(2)超级电容器的约束条件。

$$\begin{cases} \left| P_{c}(t) \right| \leq P_{c,r} \\ E_{c,\min} \leq E_{c}(t) \leq E_{c,\max} \\ V_{c,\min} \leq V_{c}(t) \leq V_{c,\max} \end{cases}$$
(18)

3.2 仿真验证

为了验证本文所提方法的正确性,基于含间歇 性负荷的"鱼塘养殖"区域的实测数据进行仿真实 验,采用本文所提EMD与希尔伯特频谱变换相结合 的方法与低通滤波器滤波方法进行对比分析。根据 1.2节所述步骤,采用EMD与希尔伯特频谱变换相 结合的方法对功率缺额 ΔP 进行高、低频率分解,结 果见附录中图A6。由图可见,功率缺额 ΔP 被分解 为8个IMF(f_{IMFi} , $i=1, 2, \dots, 8$)以及余量 r_{\circ} , f_{IMFi} 的波 动程度随着i的增加而变缓,结合希尔伯特频谱变换 将各阶 $f_{\rm ME}$ 转化为瞬时频率-时间函数 $c_i(t)$,结果见 附录中图A7。根据1.3节所述确定分频频率的方 法,对相邻2条频率-时间曲线的能量混叠进行 优化,确定分频频率为0.024 p.u.,能量混叠最小 的相邻2条曲线为 $c_5(t)$ 、 $c_6(t)$,由此将功率缺额 ΔP 分解为高频功率 $P_{\text{high}} = c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5$ 和低频功率 $P_{\text{low}} = c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + r_\circ$ 高、低频功率变化曲线如图 4所示。

保持系统相关参数不变,采用传统低通滤波器滤波方法对 HESS 进行优化配置,截止频率为 3.3×10⁻⁴ Hz,时间常数为50 min,所得优化配置结果 与本文方法所得优化配置结果对比见表1。由表可 知,本文方法配置的额定功率和额定容量均低于低



图4 高、低频功率变化曲线

Fig.4 Change curves of high and low frequency power

表1 2种方法的优化配置结果对比

 Table 1
 Comparison of optimal allocation results

 between two methods

会料	优化结果	
<i>参</i> 蚁	本文方法	传统方法
蓄电池额定功率 / MW	5.50	6.27
蓄电池额定容量 / (MW · h)	7.694	8.176
超级电容器额定功率 / MW	10.00	10.76
超级电容器额定容量/(MW·h)	0.671	0.865
HESS的功率投资成本 / 万元	2850.0	3172.2
HESS的容量投资成本 / 万元	495.64	569.24
HESS的初始投资成本 / 万元	3 3 4 5.64	3741.44
HESS的年运维成本 / 元	4132.5	4520.5
HESS的投资运行总成本 / 万元	3 3 4 6.05	3741.89

通滤波器滤波方法所得配置结果,这是因为本文方 法有效避免了低通滤波器在滤波过程中的延迟所造 成储能优化容量偏高的问题,对高、低频率分界点进 行优化选择,解决了分频中存在的模态混叠问题,使 得功率指令更加准确,从而降低了HESS的配置容 量,达到降低系统综合成本的目的。

利用本文方法所得最优容量配置的HESS 对间 歇性负荷波动进行平抑,效果如图5所示。与传统 传统低通滤波器滤波方法的平抑效果相比,本文方 法平抑后的负荷功率波动性较小,可见本文方法实 现了对间歇性负荷功率波动更高效率的平抑,极大 地缩小了有功功率缺额的峰谷差距。



Fig.5 Effect comparison of HESS suppressing intermittent load between two methods

4 结论

针对间歇性负荷波动引起的低压配电网供电可 靠性与电压质量问题,本文提出了一种考虑容量成 本与功率成本的HESS用于平抑间歇性负荷的分频 定容方法。首先,利用EMD与希尔伯特频谱变换相 结合的方法,对间歇性负荷所引起的功率缺额进行 高、低频分解,低频功率波动由蓄电池进行平抑,高 频功率波动由超级电容器进行平抑,实现了超级电 容器和蓄电池之间的优势互补;然后,利用遗传算法 对 HESS 的容量进行优化,确定系统的额定功率与 额定容量;最后,基于江苏省扬州市"鱼塘塘养"区域 的真实数据进行算例仿真分析,对比了本文方法与 传统滤波方法的优化配置结果,结果表明本文方法 在实现平抑间歇性负荷的同时,具有更好的功率分 配效果,降低了蓄电池和超级电容器的容量,提高了 系统运行的经济性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- 刘海涛,许伦,郝思鹏,等. 基于配电网分区的分布式混合储能 优化方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):137-145.
 LIU Haitao,XU Lun,HAO Sipeng, et al. Optimization method of distributed hybrid energy storage based on distribution network partition[J]. Electric Power Automation Equipment,2020, 40(5):137-145.
- [2]苏浩,张建成,冯冬涵,等. 模块化混合储能系统及其能量管理 策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):127-133,140.
 SU Hao,ZHANG Jiancheng,FENG Donghan, et al. Modular hybrid energy storage system and its energy management strategy
 [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):127-133,140.
- [3] LIU X, WANG P, LOH P C. A hybrid AC / DC microgrid and its coordination control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 278-286.
- [4] 赵源筱,耿光超,江全元,等.考虑功率变化速率的储能辅助单 机调频控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(1):141-147.
 ZHAO Yuanxiao,GENG Guangchao,JIANG Quanyuan, et al. Frequency control strategy of single-generator supporting by energy storage considering power change rate[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(1):141-147.
- [5] 王育飞,王成龙,薛花,等. 计及源-储-荷功率特性的飞轮储能 系统容量配置方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(1):119-124,132.
 WANG Yufei,WANG Chenglong,XUE Hua,et al. Capacity configuration method of flywheel energy storage system considering power characteristics of generation-energy storage-load [J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(1):119-124,132.
- [6] RAFIEE SANDGANI M, SIROUSPOUR S. Energy management in a network of grid-connected microgrids / nanogrids using compromise programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(3):2180-2191.
- [7] 陈谦,陈霄逸,金宇清,等. 基于混合储能的大型风电场优化控制[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):70-76.
 CHEN Qian,CHEN Xiaoyi,JIN Yuqing,et al. Optimal control of large-scale wind farm based on hybrid energy storage[J].
 Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):70-76.
- [8] XIAO J, BAI L Q, LU Z G, et al. Method, implementation and application of energy storage system designing [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2014, 24(3): 378-394.
- [9] JIANG Q Y, HONG H S. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations [J]. IEEE Transactions

on Power Systems, 2013, 28(2): 1363-1372.

- [10] 陈厚合,杜欢欢,张儒峰,等.考虑风电不确定性的混合储能容量优化配置及运行策略研究[J].电力自动化设备,2018,38(8):174-182,188.
 CHEN Houhe, DU Huanhuan, ZHANG Rufeng, et al. Optimal capacity configuration and operation strategy of hybrid energy storage considering uncertainty of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(8):174-182,188.
- [11] 蒋玮,周赣,王晓东,等.一种适用于微电网混合储能系统的功率分配策略[J].电力自动化设备,2015,35(4):38-43,52.
 JIANG Wei,ZHOU Gan,WANG Xiaodong, et al. Power allocation strategy of hybrid energy storage system for microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 38-43,52.
- [12] 罗鹏,杨天蒙,娄素华,等. 基于频谱分析的微网混合储能容量 优化配置[J]. 电网技术,2016,40(2):376-381.
 LUO Peng,YANG Tianmeng,LOU Suhua, et al. Spectrum analysis based capacity configuration of hybrid energy storage in microgrid[J]. Power System Technology,2016,40(2):376-381.
- [13] 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.
- [14] 张鹏,张峰,梁军,等.采用小波包分解和模糊控制的风电机组 储能优化配置[J]. 高电压技术,2019,45(2):609-617.
 ZHANG Peng,ZHANG Feng,LIANG Jun, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage system for wind farm using wavelet packet decomposition and fuzzy control[J]. High Voltage Engineering,2019,45(2):609-617.
- [15] 葛乐,袁晓冬,王亮,等.面向配电网优化运行的混合储能容量 配置[J].电网技术,2017,41(11):3506-3513.
 GE Le,YUAN Xiaodong,WANG Liang,et al. Capacity configuration of hybrid energy storage system for distribution network optimal operation[J]. Power System Technology,2017,41(11): 3506-3513.
- [16] 谢石骁,杨莉,李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法[J]. 电网技术,2012,36(5):79-84.
 XIE Shixiao,YANG Li,LI Lina. A chance constrained programming based optimal configuration method of hybrid energy storage system[J]. Power System Technology,2012,36(5):79-84.
- [17] 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 opti-

mal 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.

- [18] 魏骜,茅大钩,韩万里,等.基于EMD和长短期记忆网络的短期电力负荷预测研究[J]. 热能动力工程,2020,35(4):203-209.
 WEI Ao,MAO Dajun,HAN Wanli, et al. Short-term load fore-casting based on EMD and long short-term memory neural networks[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(4):203-209.
- [19] 周泓光,吴林,朱宏刚,等. 基于改进的Hilbert-Huang变换电力 系统闪变研究方法[J]. 工业仪表与自动化装置,2020(3): 3-7,14.
 ZHOU Hongguang,WU Lin,ZHU Honggang, et al. Voltage flicker measurement method based on improved Hilbert-Huang transform in power system[J]. Industrial Instrumentation &
- [20] 赵会茹,赵一航,郭森. 基于互补集合经验模态分解和长短期

Automation, 2020(3): 3-7, 14.

记忆神经网络的短期电力负荷预测[J],中国电力,2020.53 (6):48-55.

ZHAO Huiru, ZHAO Yihang, GUO Sen. Short-term load forecasting based on complementary ensemble empirical mode decomposition and long short-term memory [J]. Electric Power, 2020,53(6):48-55.

作者简介:

任 凯(1994—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究 方向为混合储能系统在电力系统中的应用(E-mail:renkai@ seu.edu.cn);



蒋 玮(1982-),男,江苏南通人,副 教授,博士研究生导师,博士,主要研究方 向为电力系统状态估计、电力电子技术在 电力系统中的应用(E-mail: jiangwei@seu. edu.cn):

杨 波(1977-),男,江苏姜堰人,教授 级高级工程师,博士,主要研究方向为储能 应用、电力电子装置研制(E-mail: yangbo@

凯 epri.sgcc.com.cn)

任

(编辑 陆丹)

Optimal frequency division and capacity determination technology of hybrid energy storage system for suppressing intermittent load

REN Kai¹, JIANG Wei¹, YANG Bo^{1,2}, SANG Bingyu², LIU Zhong³, LI Peipei³

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. China Electric Power Research Institute(Nanjing), Nanjing 210003, China;

3. Yangzhou Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yangzhou 225000, China)

Abstract: In the distribution network, intermittent loads such as fish pond and water pump can cause power peak-valley difference up to about 10 times, which affects the safe operation of distribution network. A HESS(Hybrid Energy Storage System) containing power-type and energy-type energy storage devices can be used to suppress power fluctuations of intermittent load. Therefore, the frequency division and capacity determination technology in the design process of HESS is mainly studied. The characteristics of intermittent load are analyzed in frequency domain by using the combination method of empirical mode decomposition and Hilbert spectrum transformation. According to the principle of least energy aliasing, the parts of intermittent load responded by the supercapacitor and the battery respectively are determined. The rated power and capacity of HESS are determined under the charging and discharging constraints of energy storage devices. The optimization model of HESS frequency division and capacity determination including capacity cost and power cost is established, and the genetic algorithm is used to optimize the model, obtaining the optimal capacity configuration of HESS. Based on a practical example, the simulative results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: intermittent load; hybrid energy storage system; empirical mode decomposition; Hilbert spectrum transformation; capacity configuration







图 A7 瞬时频率-时间曲线 Fig.A7 Instantaneous frequency-time curves 表 A1 系统相关参数

Table A1 System related parameters

对象	参数	取值
蓄电池	功率成本系数 K1/(元·kW ⁻¹)	3000
	容量成本系数 K ₃ /[元·(kW·h) ⁻¹]	400
	运维成本系数 K5/[元·(kW·h) ⁻¹]	0.5
	SOC 范围	[0.1, 0.9]
	充放电效率/%	80
超级电容器	功率成本系数 K2/(元·kW ⁻¹)	1200
	容量成本系数 K4/[元·(kW·h) ⁻¹]	2800
	运维成本系数 K ₆ /[元·(kW·h) ⁻¹]	0.5
	SOC 范围	[0.1, 0.9]
	充放电效率/%	95
换流器	DC/DC 效率/%	95
	DC/AC 效率/%	95