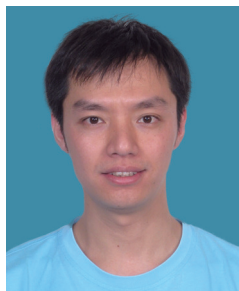


基于混合储能的可控负荷集成控制与优化

目前的研究中,微电网中负荷与储能、分布式电源运行控制之间的结合不够紧密,缺乏储能与负荷间的一体化控制方法。为减小微电网对储能系统的依赖,降低对混合储能系统配置的容量需求,提出了一种可控负荷与混合储能的集成控制方法,设计负荷储能混合控制系统(HLSS)。详细介绍了HLSS的结构,控制流程;重点叙述了HLSS内部功率最优分配策略;综合考虑微电网功率平衡、用户体验与经济运行,建立采用基于对偶单纯型的两段式迭代算法求解的多目标优化模型。仿真表明,可控负荷可以解决混合储能大容量应用时的高成本问题,而混合储能的准确调节性能补偿可控负荷的非线性功率特性。

曾 伟 孙 旻 徐在德/国网江西省电力科学研究院
周细文/江苏有能新能源有限公司



曾 伟/工程师

关键词/Keywords

微电网·
可控负荷·
混合储能系统·
负荷储能混合系统·
对偶单纯形算法·

储能技术对微电网的实现有重要作用,其应用在很大程度上解决新能源发电的波动性和随机性问题,有效提高间歇性新能源的可预测性、确定性和经济性。此外,储能技术在调频调压和改善系统有功功率、无功功率平衡水平,提高微电网稳定运行能力方面的作用也获得了广泛研究和证明^[1-2]。但储能系统主要成本是储能功率和容量,大规模应用导致的初始投资大、运行维护成本高等经济问题是制约其在微电网中发展的重要因素^[3]。针对该问题,国内外研究主要集中在混合储能(HESS)配置方式和容量优化等方面,通过功率型储能与能量型储能的互补使用与协调控制,满足微电网不同层次的技术需求。混合储能

国家科技支撑计划项目(2013BAA01B01),
国家科技部中欧中小企业节能减排科研合作资金项目
(2150804)。

技术虽然可以在一定程度上减少系统的储能成本,但并不足以解决其经济性问题,以满足微电网的大量需求。微电网通过可控负荷(CL)提供热备用,具有直接优势,且CL资源丰富、价格低廉,能迅速抵消分布式电源出力与负荷功率的不匹配造成的有功功率缺额,在提高系统安全稳定运行能力方面有巨大的潜力。一些文献提出一种通过可控负荷的有功功率和无功功率控制分布式电源功率波动,但忽略了可控负荷参与控制时的非线性问题。综上所述,目前的研究中,微电网中负荷与储能、分布式电源运行控制之间的结合不够紧密,缺乏储能和负荷间的一体化控制方法,以减小微电网对储能系统的依赖,降低对混合储能系统配置的容量需求。

本文提出了一种可控负荷与混合储能的集成控制方法(LSIC),包括HESS模块和CL模块之间的一体化控制策略和系统整体应用方案,构建了具备多时间尺度灵活响应特性的负荷储能混合控制系统(HLSS)。

HLSS系统结构

1. HLSS结构

图1为本文所提出的HLSS拓扑结构形式,主要由CL单元、HESS单元和一体化控制器三部分构成,其中CL单元包普通可控负荷与快速响应负荷;HESS单元则以充放电速度快、循环寿命长和功率密度高的超级电容储能和储能时间长、使用寿命有限和能量密度高的锂电池储能为例;一体化控制器用于接受上层控

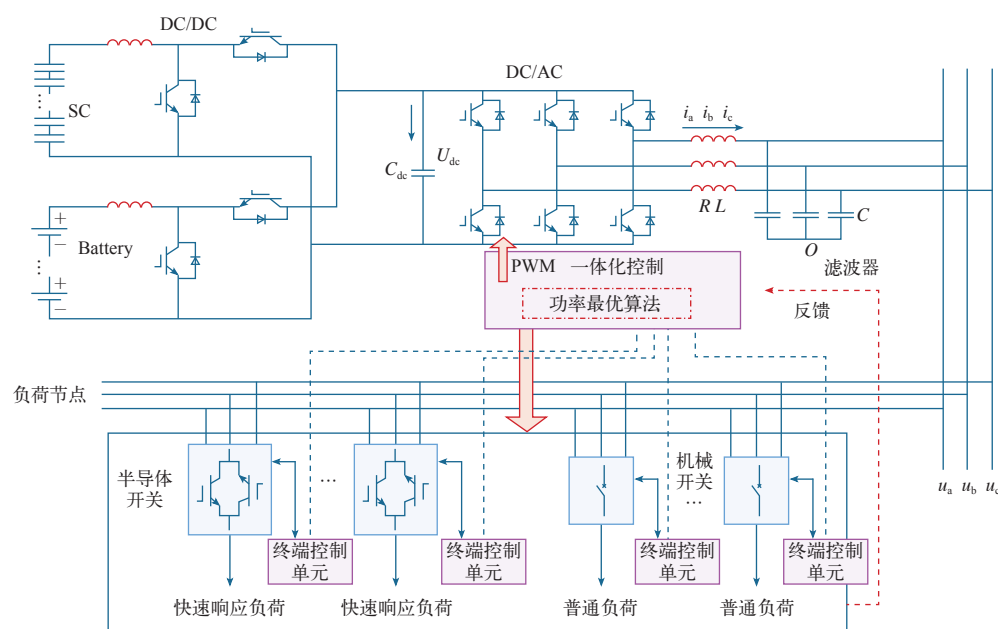


图1 HLSS系统结构示意图

制器产生的HLSS功率参考指令并实现HESS单元和CL单元之间的功率优化分配和协调控制，是HLSS系统的核心。

嵌入负荷开关中的分布式负荷终端控制器是CL开关控制信号的具体执行单元，它能够实时上传负荷运行参数，通过通信组件与负荷服务中心的动态负荷数据库进行双向实时数据传输。快速响应负荷通过固态继电器与电网连接，较普通机械式开关，其响应时间能达到毫秒级。CL作为大容量虚拟储能，通过投切行为和功率调节实现与微电网的能量交换，以减少对储能容量设置和最大充放电功率的要求，进而降低储能成本需求。

超级电容（SC）与蓄电池组（以锂离子电池为例）均采用两级结构^[6]，分别通过双向DC/DC变换器接入直流母线并联，直流母线与交流电网之间通过一个双向DC/AC变换器连接，DC/AC变换器实现有功功率和无功功率解耦控制。HESS单元主要作用是利用其准确调节，可稳定输出范围内任何功率的优点，解决负荷控制时的非线性问题，使得负荷的可控性增强，提高负荷控制时的准确程度。

2. HLSS功率优化控制策略概述

基于上述HLSS结构与LSIC一体化控制方

案，本文提出HLSS系统内部控制流程，如图2所示。

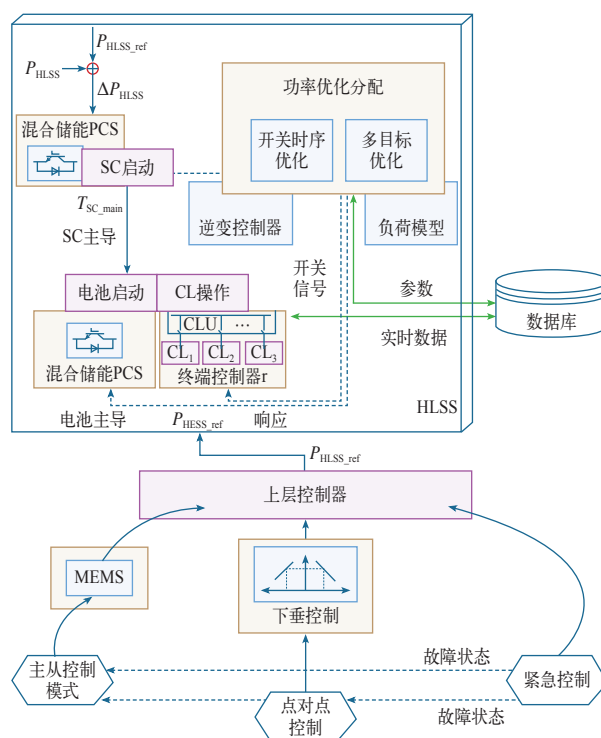


图2 HLSS系统内部分级控制流程

(1) SC主导阶段

功率型储能SC具有响应速度快、输出功率大的优点，由于功率分配与优化算法需要计算时

间,当HLSS刚接受功率参考指令 $P_{\text{HLSS_ref}}$ 时,HESS单元的PCS单独起动SC,由其为微电网提供 $T_{\text{SC_main}}$ 时间(数秒)的瞬时功率需求,该阶段由SC主导。

(2) 功率优化分配计算

HLSS中的功率分配与优化目的是生成HESS单元功率参考值 $P_{\text{HESS_ref}}$ 与CL单元的开关控制指令 $K_{\text{CL_ref}}[i]$,为多目标混合整数规划问题。优化问题建模的算法分为两个层次:控制层面的优化模型基于HESS的PCS控制模型与CL的动态响应模型,经济层面的优化模型基于HESS的经济性模型与CL的热模型和电价函数。

(3) 功率跟踪

当HLSS功率分配完成,负荷对终端控制器投切信号响应,PCS根据功率分配结果修改参考指令,当能量型储能蓄电池工作后,HESS内部接收 P_{HESS} 的参考功率指令,PCS需进行功率跟踪控制与内部功率分配。HLSS对外可视为一个PQ控制模式下的大容量储能系统,其接受的功率参考指令来源由其上层控制器在不同需求下的具体应用模式决定。

HLSS最优化功率控制策略

HESS输出功率为线性可调,但其调节范围较窄,受成本限制,CL可调容量较大,但是其可调功率为阶梯状,如何实现二者一体化控制,使其对外呈现出可调范围更宽的线性功率调节器,同时如何使得投切CL次数最少,或者投切CL带来的经济损失最小等优化问题,即为本文所要研究的问题。

1. 优化模型

首先建立两层优化模型。

HLSS时序匹配模型是运行控制层面优化问题的算法支撑,主要关心HESS单元PCS的动态响应时间及功率约束,CL单元的响应时间特性、容量特性及动态温度特性。

(1) HESS单元PCS电流控制闭环传递函数

根据DC/AC电流闭环传递函数矩阵,取 $K_p=2.1$, $K_i=132.3$, $L=2\text{ mH}$, $R=0.5\ \Omega$,则得到闭

环传递函数为

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{sk_p + k_i}{s^2L + s(R + k_p) + k_i} & 0 \\ 0 & \frac{sk_p + k_i}{s^2L + s(R + k_p) + k_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$G_{\text{HESS}}(s) = \frac{2.1s + 132.3}{0.002s^2 + 2.6s + 132.3} \quad (2)$$

(2) CL单元响应时间特性及容量特性

设CL总数为 n ,各编号为 i ,建立CL模型:

$$\text{CL}[i] = \{x_i, \tau_i, p_i, \Psi_i\} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n)$$

$$x_i = \begin{cases} 0 & \text{off} \\ 1 & \text{on} \end{cases} \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

$$\tau_i = \begin{cases} T_{\text{SSW_delay}} & \text{fast-response load} \\ T_{\text{ESW_delay}} & \text{normal load} \end{cases} \quad (4)$$

式中, x_i 为负荷开关状态函数,0表示开关处于断开状态,1表示开关处于闭合状态;响应速度向量 τ_i 表示负荷响应时间 $T_{\text{CL_delay}}$,本文忽略网络传输与通信延迟时间, $T_{\text{CL_delay}}$ 用其开关响应时间 $T_{\text{SW_delay}}$ 来替代。

本文默认CL单元中所有通过固态继电器连接的快速响应负荷其开关响应时间 $T_{\text{SSW_delay}}$ 相同,所有通过普通机电式继电器连接的普通负荷其开关响应时间 $T_{\text{ESW_delay}}$ 相同,选取 $T_{\text{SSW_delay}}=1\text{ ms}$, $T_{\text{ESW_delay}}=20\text{ ms}$ 。容量向量 p_i 是表示各CL $[i]$ 可控容量;可控负荷级别向量 $\Psi \in N_+$,是由动态负荷数据库根据控制要求排序生成。

HLSS经济优化模型是经济层面优化问题的算法支撑,主要关心HESS的充放电成本问题及CL单元的电价成本和动态温度特性。

HESS单位循环寿命成本计算公式为

$$C_{\text{total}} = C_{\text{inv}} + C_{\text{tend}} + C_{\text{set}} + C_{\text{area}} \quad (5)$$

式中, C_{total} 为混合储能系统工程、年限内总成本; C_{inv} 、 C_{tend} 、 C_{set} 和 C_{area} 分别为HESS初期投资成本、维护成本、安装成本和占地成本。

CL单元补偿电价计算公式为

$$\text{CL}[i] = \{\gamma_i\} \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

式中, γ_i 为CL $[i]$ 的单位补偿电价,由用户与电网所

签协议决定,是与负荷控制模式、停电通知时间和中断时长有关的常数。

CL单元动态热模型计算公式为

$$T_{\text{UE}}^{t+1} = \lambda_1 T_{\text{UE}}^t + \lambda_2 T_{\text{out}}^{t+1} + \lambda_3 x^{t+1} \quad (7)$$

$$f_{\text{UE}} = \min\{|T_{\text{house}} - 26|, |T_{\text{cold}} - 5|\} \quad (8)$$

式中, λ_1 、 λ_2 和 λ_3 为温度传递延迟系数,取决于其额定运行功率、等热电容、等值热电阻和等值热比率; T_{out} 为外界环境温度; t 为优化当前时刻, x^t 为 t 时刻CL开关状态函数; f_{UE} 为用户满意度函数:一般认为室内温度 T_{house} 为26℃,冰箱冷藏室 T_{cold} 为5℃时为用户最适宜温度。

2. 功率分配优化目标与约束条件

(1) 功率平衡约束

首先,由前述有负荷开关状态函数 x_i ,根据相邻两次的开关状态可以得到开关动作函数,即负荷投切函数为

$$x_i^{k+1} - x_i^k = \begin{cases} 1 & \text{up} \\ 0 & \text{hold} \\ -1 & \text{down} \end{cases} \quad i=1,2,3,\dots,n \quad k=1,2,3,\dots,n \quad (9)$$

式中, k 为开关动作次数,由此可得到第 $k+1$ 次负荷投切时的功率平衡方程式为

$$x_0^{k+1} - x_0^k + \sum_{i=1}^n p_i (x_i^{k+1} - x_i^k) = \Delta p \quad (10)$$

式中, x_0^k 为HESS输出功率指令,为实数; P_i 为第 i 个CL可控功率,为负数; Δp 为HLSS功率缺额。

由式(10)可得到

$$x_0^{k+1} + \sum_{i=1}^n p_i x_i^{k+1} = x_0^k + \sum_{i=1}^n p_i x_i^k + \Delta p = p_{\text{ref}} \quad (11)$$

式(11)即为第 $k+1$ 次控制的功率平衡约束式。

(2) 最大功率限制约束

按上述所建功率平衡模型,HESS的功率指令 x_0^{k+1} 仅受混合储能系统PCS的限制,即其上下限为定值,无须根据当前输出功率动态调整。即

$$-p_0^{(\max)} \leq x_0^{k+1} \leq p_0^{(\max)} \quad (12)$$

式中, $p_0^{(\max)}$ 为HESS系统最大功率限制,一般取决于超级电容的最大充放电功率。

(3) 负荷投切时间间隔约束

为保证用户的满意度,一般禁止负荷的频繁

投切,因此须设置可控负荷CL单次投切最小时间间隔,保证两次负荷控制行为之间的时间间隔大于用户协议商定的时间

$$|x_i^{k+1} - x_i^k| \Delta t_i \geq T_i^{(\min)} \quad (13)$$

式中, Δt_i 为CL两次动作间隔时间; $T_i^{(\min)}$ 为最小动作间隔时间。

(4) 负荷用户体验约束

电热型负荷对用户体验的影响在于温度,参考前述负荷热模型,给出负荷温度约束为

$$\begin{aligned} T_{\min} &\leq T_{\text{UE}}^t \leq T_{\max} \\ T_{\text{UE}}^{t+1} &= \lambda_1 T_{\text{UE}}^t + \lambda_2 T_{\text{out}}^{t+1} + \lambda_3 x^{t+1} \end{aligned} \quad (14)$$

式中, λ_1 、 λ_2 和 λ_3 为温度传递延迟系数,取决于其额定运行功率、等值热电容、等值热电阻和等值热比率; T_{out} 为外界环境温度; $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 是用户所允许的最高温度与最低温度; t 为优化当前时刻, x^t 为 t 时刻CL开关状态函数。需要提及的是,由于对用户体验(即温度)的优化以时间为单位而不是投切次数,故此处给出关于 t 的函数。

(5) 控制层面优化目标

上述为负荷投切与HESS充放电之间的基本约束关系,满足该约束关系的动作变量(x_i , $i=0,1,2,3,\dots,n$)有无穷多个可能的结果,称为可行域 S ,因此需要在 S 中寻找某一个点,能够使得某个指标达到最优,如使得负荷投切个数最少

$$\min J_n = \sum_{i=1}^n |x_i^{k+1} - x_i^k| \quad (15)$$

由负荷动作函数可知, J_n 最小时,所需动作的CL数目最小。

负荷切除选择时,应尽量选择优先级低的CL,而负荷投入时,则应尽量选择优先级高的CL投入,因此建立优先级优化标量函数

$$\min J_p = -\sum_{i=1}^n (x_i^{k+1} - x_i^k) p_i = -\sum_{i=1}^n x_i^{k+1} p_i + \sum_{i=1}^n x_i^k p_i \quad (16)$$

式中, p_i 为各CL优先级系数;第二项 $\sum_{i=1}^n x_i^k p_i$ 为上一次控制结果,为已知量,其值对 J_p 寻优不产生影响,因此可将其略去。

当功率指令变化时,大部分情况,希望HLSS能以尽可能快的速度响应,而HLSS中各部分功率

单元的响应时间不尽相同,因此可得到优化标量函数

$$\min J_t = \max \left(\left| x_i^{k+1} - x_i^k \right| \tau_i \right) = \|rt\|_\infty \quad (17)$$

式中, $\|rt\|_\infty$ 为响应时间向量 rt 的无穷大范数。

(6) 经济层面优化目标

上文列出的3个优化目标函数皆为从运行控制性能角度考虑,对于CL与HESS,CL的投切和HESS的充放电都不可避免地具有经济成本与用户满意度的问题。因此,根据上一节经济模型与热模型,得到

$$\min J_e = -\sum_{i=1}^n \left(x_i^{k+1} - x_i^k \right) \gamma_i p_i + x_0^{k+1} \gamma_0 \quad (18)$$

$$\min J_r = -\sum_{i=1}^n \left(x_i^{t+1} - x_i^t \right) \gamma_i p_i + x_0^{t+1} \gamma_0 \quad (19)$$

其中,用户体验方面的优化应是按时间进行,是不与功率参考指令相关的常规优化行为,每隔 Δt 时间进行一次,考虑温度变化的缓慢性,一般设置为0.5 h左右。

整理前述内容如下:

$$\begin{cases} \text{运行控制优化目标} \begin{cases} \text{ob1: } \min J_n = \sum_{i=1}^n \left| x_i^{k+1} - x_i^k \right| \\ \text{ob2: } \min J_p = -\sum_{i=1}^n x_i^{k+1} p_i + \sum_{i=1}^n x_i^k p_i \\ \text{ob3: } \min J_t = \max \left(\left| x_i^{k+1} - x_i^k \right| \tau_i \right) = \|rt\|_\infty \end{cases} \\ \text{经济性优化目标} \begin{cases} \text{ob4: } \min J_e = -\sum_{i=1}^n \left(x_i^{k+1} - x_i^k \right) \gamma_i p_i + x_0^{k+1} \gamma_0 \\ \text{ob5: } \min J_r = -\sum_{i=1}^n \left(x_i^{t+1} - x_i^t \right) \gamma_i p_i + x_0^{t+1} \gamma_0 \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)可知,上述问题为以 x_i^{k+1} , $i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ 为决策变量的多目标混合整数优化问题,其可行域为超平面上的多面体。对于多目标线性规划问题,可采用线性加权法,或者主要目标法等求解算法。

3. 求解算法与控制流程

优化问题的求解方法已有很多的研究成果,常基于迭代计算完成。迭代需要一个严格可行的起点 $x(0)$, 当 $x(0)$ 点未知时,该方法在初步阶段进

行严格可行点计算(或发现约束不可行),找到的严格可行点将其作为第二阶段障碍法的起点。

优化问题需要转化为单目标优化问题,本文通过线性加权法实现,通过数学变换可将其改写成标准形式,即

$$\begin{aligned} \min J &= c^T x \\ \text{St } Ax &= b, x \geq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

式中,决策向量 x 由原决策变量 x_i^{k+1} , $i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ 及其扩展的松弛变量组成, c 为考虑不同运行性能的最终费用系数向量; $A = (B, N)$; B 为基矩阵; N 为非基矩阵。与之对偶的优化问题为

$$\begin{aligned} \min J &= b^T \omega \\ \text{St } A^T \omega &\leq c \end{aligned} \quad (22)$$

本文采用两段式解法,阶段 I 中采用对偶单纯形法,寻找对偶可行基本解,首先计算基本可行解变量,若 $\bar{b} = B^{-1}b \geq 0$, 则得到基本可行解 $x_B^* = B^{-1}b$, $x_N^* = 0$; 若不满足,则寻找出基变量,并进行相容检测,若优化问题是相容的,则根据判别数确认入基变量,其中判别数向量为 $r_N^T = c_N^T - w_N^T$, 确定入基变量后,进行转轴操作后,进行下一轮迭代,直到找到可行基本解。

阶段 II 中,以阶段 I 计算结果作为迭代起点,采用原始单纯形法进行迭代寻优计算,首先计算判别数向量,并确定入基变量,若条件 $r_q \geq 0$ 满足,则得到原始优化问题的最优解;若不满足,计算变方向向量,并判断原始优化问题时有解,最后确定出基变量,并进行转轴操作,进入下一次迭代。

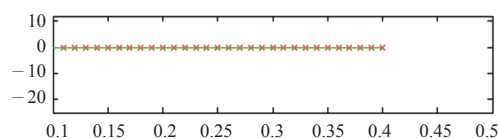
算例分析

为验证本文所提功率优化分配算法的正确性,建立仿真平台,包括混合储能单元与可控负荷单元结合的HLSS和相应控制与优化模块。配置6个CL支路,设定负荷容量 $P_{CL} = [-20; -15; -5; -10; -30; -8; -6; -20; -10]$ (kW), 设定补偿电价分别为 $[0.71; 0.52; 0.4; 0.48; 0.63; 0.5; 0.55; 0.31; 0.48]$, 响应时间 T_{CL} 为 $[0.1; 0.1; 0.1; 0.1; 0.001; 0.001; 0.001; 0.001; 0.001]$; HESS容量为 ± 10 kW, 响应时间为0.05 s。

单独HESS的功率调节范围为 $[-10, 10]$ ，当与CL一体化控制后，其可调容量上升到 $[-110, 10]$ ，可调范围大大增加，在调节范围内，平滑可调，弥补了CL的离散调节特性。

本文仿真运行工况为：电网输出85 kW时，突变为35 kW，即HLSS功率指令由 -85 kW突变为 -35 kW，分别以3种不同的优化结果进行了对比，仿真结果如图3所示。

图3为经济目标函数优化分配结果，优化总经济费用为30.5，图中总功率可以跟踪参考功率，符

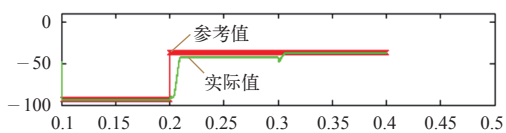


(h) CL6功率仿真图

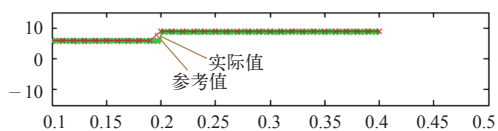
图3 经济优化目标下仿真示意图

合功率平衡约束，HESS响应速度较快，且在调节范围内平滑线性可调。基于经济优化目标，满容量放电，各CL有投有切。

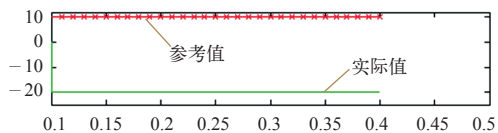
最少投切次数优化结果如图4所示。在优化目标的作用下，优化可行解为储能由 -8 kW充电状态变为4 kW放电状态，同时CL2与CL3切除，所投切负荷数最少，满足电网对输出功率的要求，但是响应速度受CL2响应速度限制较慢。



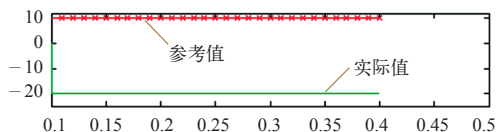
(a) 总功率仿真图



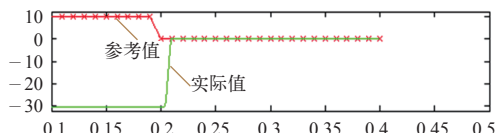
(b) HESS功率仿真图



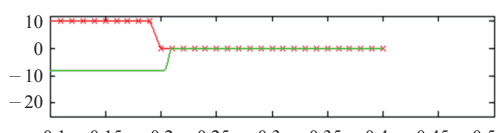
(c) CL1功率仿真图



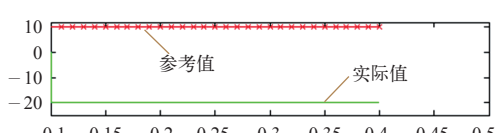
(d) CL2功率仿真图



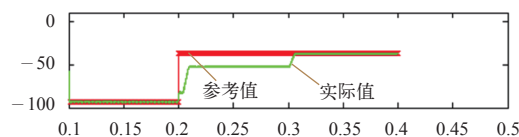
(e) CL3功率仿真图



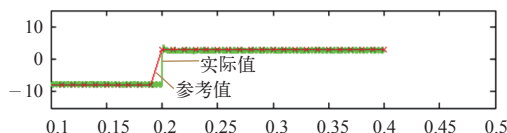
(f) CL4功率仿真图



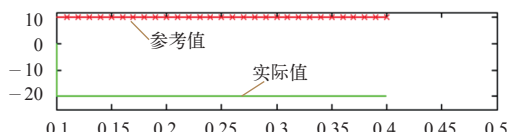
(g) CL5功率仿真图



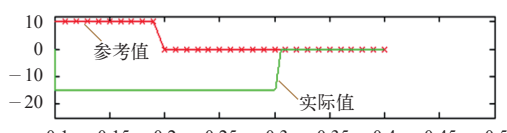
(a) 总功率仿真图



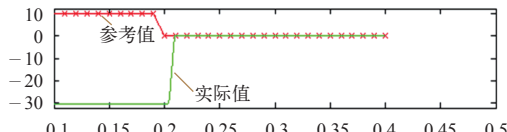
(b) HESS功率仿真图



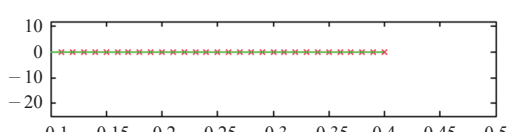
(c) CL1功率仿真图



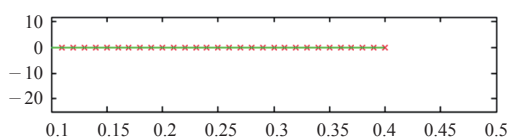
(d) CL2功率仿真图



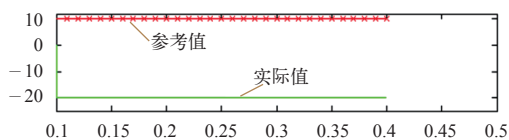
(e) CL3功率仿真图



(f) CL4功率仿真图



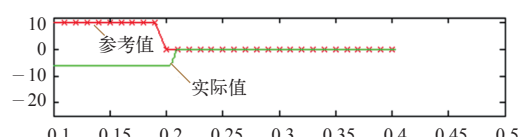
(g) CL5功率仿真图



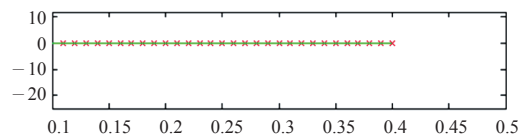
(h) CL6功率仿真图

图4 负荷动作最少优化目标下仿真

最快响应速度优化仿真结果如图5所示，参与投切的CL都为快速响应CL，同时HESS响应补偿非线性功率缺额，HLSS快速满足电网对于功率输出的要求，与前述优化结果对比，其响应速度达



(g) CL5功率仿真图



(h) CL6功率仿真图

图5 最快响应速度优化仿真结果

到最大，即响应时间最短，但是投切的负荷数目较多。

结束语

本文提出了一种基于混合储能系统的可控负荷一体化控制方法，并结合混合储能技术与负荷控制技术两者的优点设计了HLSS系统。详细介绍了HLSS系统的结构和控制流程，并通过Matlab/Simulink软件建立HLSS仿真平台，对所提出的一体化控制方法在不同优化目标下的效果进行验证。仿真结果表明，可控负荷作为热备用资源可以解决储能的大容量时的高成本问题，而储能的准确调节性能可以补偿可控负荷的非线性功率特性。HLSS的应用能有效提高微电网控制的灵活性与建设的经济性。

参考文献

- [1] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 6-11.
- [2] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
- [3] 刘天琪, 江东林. 基于储能单元运行方式优化的微电网经济运行[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 45-50.
- [4] Dougal R A, Liu Shengyi, White R E. Power and life extension of battery-ultracapacitor Hybrids[J]. IEEE Trans. on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(1): 120-130.

(收稿日期: 2014-12-21) EA