

# 含规模化储能系统的最优潮流模型与求解方法

高戈, 胡泽春

(清华大学电机系, 北京 100084)

**摘要:** 大规模储能系统的应用可提高电网运行的经济性, 其优化调度的难点是如何处理能量约束。提出了一种含储能系统经济调度的滚动优化思路, 在建立储能系统细化模型的基础上, 构造了考虑规模化储能系统的多时段最优潮流模型, 并对剩余能量约束进行了松弛与自适应调整。通过等效变换与 Lagrange 松弛, 推导出其对偶问题进行求解。该对偶问题是一个凸的半正定规划, 且在一定条件下对偶间隙为零, 有效提高了解的全局最优性。对储能系统单点接入和多点接入的算例进行了测试, 并与内点法计算的结果进行了比较, 验证了所提模型和算法的有效性。

**关键词:** 最优潮流; 储能系统; Lagrange 松弛; 半正定规划

## Formulation and solution method of optimal power flow with large-scale energy storage

GAO Ge, HU Ze-chun

(Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The application of large-scale energy storage system (ESS) can improve the economical efficiency of power system, while it brings optimal operation problem on how to deal with energy constraint. An idea of rolling optimization of operation considering ESS is proposed. On the basis of a detailed modeling of ESS, a multi-period optimal power flow (OPF) model including large-scale ESS is put forward, and the constraint of remaining energy is relaxed and adaptively adjusted. Through equivalent transformation and Lagrange relaxation, its dual problem can be derived, which is a convex semidefinite programming. It can be proved that under certain conditions the duality gap is zero. With this method the global optimal solution can be guaranteed. Examples of ESS integrating in single bus and multiple buses are tested. The results are compared with those of interior-point method, verifying the accuracy of the proposed formulation and solution method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51107060).

**Key words:** optimal power flow; energy storage system; Lagrange relaxation; semidefinite programming

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)21-0009-08

## 0 引言

近年来, 随着储能技术的不断进步, 越来越多的新型储能系统 (Energy Storage System, ESS) 朝着实用化的方向发展<sup>[1-7]</sup>。大规模新能源发电电网的挑战、分布式电源的增长、输电走廊的紧缺等诸多因素促进了新型储能在电力系统中的应用<sup>[8-12]</sup>。目前兆瓦级以上的大规模储能技术以抽水蓄能、电池储能、压缩空气储能等形式为主。

储能系统接入电力系统运行后, 其运行优化是需要解决的关键问题。最优潮流 (Optimal Power Flow, OPF) 是解决电力系统安全经济运行的重要手段, 继 20 世纪 60 年代初被提出以来<sup>[13]</sup>, 一直受

到广泛关注。OPF 问题属于复杂的非线性非凸优化问题, 寻求其全局最优解通常是一个 NP 困难问题<sup>[14]</sup>。近年来, 如何高效求解 OPF 问题取得了一定进展, 被提出的求解方法主要包括非线性规划算法<sup>[13]</sup>、智能算法<sup>[15]</sup>等。在非线性规划算法中, 有些需要可行解作为起始点 (如内点法), 有些只有迭代收敛时才能得到可行解<sup>[16]</sup>。智能算法的全局最优性无法保证, 计算费时, 尤其不适用于大规模系统。文献 [14,17] 中通过对 OPF 模型的数学变换, 得到了其对偶问题, 且可以证明在一定条件下, 该对偶问题与原问题的对偶间隙为零。此对偶问题是一个凸的半正定规划, 因而可以在多项式时间内求得全局最优解。

储能系统可与电网进行双向电能交互, 但存储能量受限, 需要考虑多时段耦合的能量约束, 因而

在 OPF 问题中需要进行特殊处理, 在常规 OPF 模型的基础上考虑多个负荷断面的优化, 增大了问题的规模和求解难度。文献[18]中建立了考虑储能参与的最优有功潮流模型, 通过忽略无功潮流, 使得 OPF 成为凸优化问题。文献[19]提出了含有风电和储能接入的滚动最优潮流模型, 并对风电和储能的容量配置和位置分布进行了讨论。文献[20]中建立了微网中考虑储能的最优潮流模型, 分别考虑了三相平衡和三相不平衡的情况。文献[21]在文献[14,17]的基础上建立了考虑储能系统的 OPF 模型, 并证明了在引入储能之后仍能满足对偶间隙为零的条件。但文中所建立的储能系统模型没有考虑其运行效率, 也没有考虑储能系统在一个调度周期内的能量平衡。此外, 对于算法的准确性, 文中没有给出与其他算法的比较验证。

本文首先探讨了含储能系统最优潮流的滚动优化思路, 在建立储能系统细化模型的基础上, 提出了考虑规模化储能系统的多时段最优潮流模型, 并对剩余能量约束进行了松弛与自适应调整。通过等效变换与 Lagrange 松弛推导出其凸优化形式的对偶问题, 进而求得原问题的最优解。随后对储能系统单点接入和多点接入的算例进行了测试, 并与内点法计算的结果进行了比较, 验证了所提模型和算法的有效性。

## 1 考虑储能的最优潮流模型

### 1.1 含储能系统最优潮流的滚动优化

由于储能系统的能量受限, 产生时段耦合约束, 因此需要在经典最优潮流的基础上考虑多个负荷断面的优化。由于电力系统运行状态的不确定性, 应该对储能系统的功率进行滚动优化和调整。图 1 示意了滚动优化的流程。从初始时刻  $t=T_0$  开始,

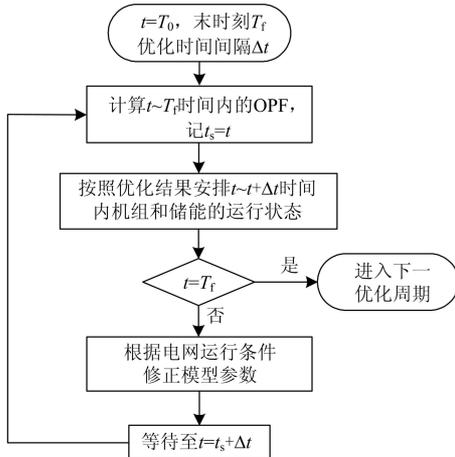


图 1 含储能系统最优潮流的滚动优化流程示意图

Fig. 1 Rolling optimization process of OPF considering ESS

按固定的时间间隔  $\Delta t$  启动优化计算, 求解  $t \sim T_f$  时间内的 OPF, 按照最新的优化结果安排  $t \sim t+\Delta t$  时间内机组和储能系统的运行状态, 并根据电网运行条件修正模型参数, 等待至  $t+\Delta t$  的时刻执行下一次优化计算, 直至到达末时刻  $t=T_f$  后进入下一优化周期。

### 1.2 储能系统的多时段建模

表 1 给出了储能系统的多时段运行参数和决策变量, 其中下标  $k$  表示储能系统的编号。

表 1 储能系统的运行参数与变量  
Table 1 Operation parameters and variables of ESS

	符号	说明
运行 参数	$B_k^{\max}, B_k^{\min}$	储能系统容量上下限
	$g_k$	存储能量初始值/最终目标值
	$R_k^{c,\max}, R_k^{c,\min}$	储能系统吸收有功功率上下限
	$R_k^{d,\max}, R_k^{d,\min}$	储能系统释放有功功率上下限
	$S_k^{\max}, S_k^{\min}$	储能系统吸收无功功率上下限
	$\eta_k^c$	储能系统吸收有功效率
	$\eta_k^d$	储能系统释放有功效率
变 量	$b_k(t)$	$t$ 时刻的存储能量
	$r_k^c(t), r_k^d(t)$	$t$ 时段储能系统吸收、释放有功功率
	$s_k(t)$	$t$ 时段储能系统吸收无功功率
	$\Delta g_k$	存储能量最终值偏移量

考虑全天从  $1 \sim T+1$  时刻, 共  $T$  个时段的运行情况, 其中时段  $t$  对应时刻  $t \sim t+1$ 。储能系统的功率和存储能量需要满足以下约束:

$$R_k^{c,\min} \leq r_k^c(t) \leq R_k^{c,\max} \quad t=1, \dots, T \quad (1)$$

$$R_k^{d,\min} \leq r_k^d(t) \leq R_k^{d,\max} \quad t=1, \dots, T \quad (2)$$

$$S_k^{\min} \leq s_k(t) \leq S_k^{\max} \quad t=1, \dots, T \quad (3)$$

$$B_k^{\min} \leq b_k(t) \leq B_k^{\max} \quad t=1, \dots, T+1 \quad (4)$$

储能系统存储的能量  $b_k(t)$  满足下面的一阶差分方程:

$$b_k(t+1) = b_k(t) + r_k^c(t)\eta_k^c - r_k^d(t)/\eta_k^d \quad t=1, \dots, T \quad (5)$$

初始条件中给出了储能系统在起始时刻  $t=0$  的存储能量, 即约束式(6)。为保证储能系统循环运行, 全天运行结束后的剩余存储能量应尽可能地回到初始值。为使调度更加灵活, 本文将剩余存储能量松弛至一定的区间范围内, 如约束式(7)、式(8)所示。

$$b_k(1) = g_k \quad (6)$$

$$g_k - \Delta g_k \leq b_k(T+1) \leq g_k + \Delta g_k \quad (7)$$

$$\Delta g_k \geq 0 \quad (8)$$

### 1.3 含储能系统的最优潮流模型

考虑一个包含  $n$  个节点,  $m$  台机组 ( $m \leq n$ ),  $n_e$

个储能系统 ( $n_e \leq n$ ) 的电力系统。定义全部节点集合  $N := \{1, \dots, n\} \mathbb{F}\mathbb{K}$ , 发电机节点集合  $G := \{1, \dots, m\}$ , 含储能的节点集合  $E := \{1, \dots, n_e\}$ 。该电力网络的导纳矩阵用  $\mathbf{Y} \in \mathbf{C}^{n \times n}$  表示, 相关运行参数与变量如表 2 所示。

表 2 电力系统的运行参数与变量  
Table 2 Operation parameters and variables of power system

	符号	说明
运行参数	$P_k^d(t), Q_k^d(t)$	$t$ 时刻节点 $k$ 的有功、无功负荷
	$P_l^{\max}, P_l^{\min}$	节点 $l$ 处发电机的有功出力上下限
	$Q_l^{\max}, Q_l^{\min}$	节点 $l$ 处发电机的无功出力上下限
	$V_k^{\max}, V_k^{\min}$	节点 $k$ 处电压幅值上下限
变量	$P_k^g(t), Q_k^g(t)$	$t$ 时段节点 $k$ 的有功、无功出力
	$\dot{V}_k(t)$	$t$ 时刻节点 $k$ 的电压相量

考虑机组全天的运行情况, 时间的定义与 1.2 中一致。在发电机节点  $l \in G$ , 发电机的有功和无功出力需满足约束:

$$P_l^{\min} \leq P_l^g(t) \leq P_l^{\max} \quad t=1, \dots, T \quad (9)$$

$$Q_l^{\min} \leq Q_l^g(t) \leq Q_l^{\max} \quad t=1, \dots, T \quad (10)$$

在节点  $k \in N$ , 电压  $\dot{V}_k(t)$  的幅值需满足:

$$V_k^{\min} \leq |\dot{V}_k(t)| \leq V_k^{\max} \quad t=1, \dots, T \quad (11)$$

对于节点  $k \in N$ , 系统的节点潮流约束可以表示为

$$\begin{aligned} \dot{V}_k(t) \dot{I}_k^*(t) &= P_k^g(t) - P_k^d(t) - r_k^c(t) + \\ & r_k^d(t) + [Q_k^g(t) - Q_k^d(t) - s_k(t)]i \end{aligned} \quad (12)$$

$$t=1, \dots, T$$

其中,  $\dot{\mathbf{I}}(t) = \mathbf{Y}\dot{\mathbf{V}}(t)$ , 并且约定对于非发电机节点  $k \in N \setminus G$ ,  $P_k^g(t) = Q_k^g(t) = 0$ 。

对于节点  $k \in E$  处的储能系统而言, 需要满足约束式(1)~式(7), 对于不含储能系统的节点  $k \in N \setminus E$ , 约定  $R_k^{c,\max}, R_k^{c,\min}, R_k^{d,\max}, R_k^{d,\min}, B_k^{\max}, B_k^{\min}$  均为零。由以上分析可以得到考虑储能的最优潮流模型如式(13)。

$$\begin{aligned} \varphi := & \min_{V_k(t), P_k^g(t), Q_k^g(t), b_k(t), r_k^c(t), r_k^d(t), s_k(t)} \\ & \left[ \sum_{t=1}^T \sum_{l \in G} f_l(P_l^g(t)) + \sum_{k \in E} c_k \Delta g_k \right] \end{aligned} \quad (13)$$

s.t. 式(1)~式(12)

其中:  $f_l(P_l^g(t)) = c_{l2}(P_l^g(t))^2 + c_{l1}P_l^g(t) + c_{l0}$  为机组

的发电成本函数;  $c_k \Delta g_k$  表示对最末时刻剩余存储能量偏移量的惩罚项。如图 1 所示, 每次输出最新优化结果之后, 惩罚系数  $c_k$  根据未来电网运行条件被修正, 例如可以基于储能系统单位吸收/释放能量对传统机组发电费用的减少量取值。

## 2 求解方法

由于约束式(11)和约束式(12)的非凸性, 最优潮流问题式(13)是一个非凸优化问题。本文将通过如下方式对其进行求解: 对原问题式(13)进行凸化松弛, 并求解其松弛之后的 Lagrange 对偶问题。可以证明, 在一定条件下, Lagrange 对偶问题与原问题式(13)的对偶间隙为零。

### 2.1 含储能最优潮流的等价变换

首先定义如下变量:

$$\mathbf{M}_k := \begin{bmatrix} \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T & 0 \\ 0 & \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}'_k := \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T \mathbf{Y}$$

$$\mathbf{Y}_k := \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \text{Re}\{\mathbf{Y}'_k + (\mathbf{Y}'_k)^T\} & \text{Im}\{(\mathbf{Y}'_k)^T - \mathbf{Y}'_k\} \\ \text{Im}\{\mathbf{Y}'_k - (\mathbf{Y}'_k)^T\} & \text{Re}\{\mathbf{Y}'_k + (\mathbf{Y}'_k)^T\} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{Y}}_k := -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \text{Im}\{\mathbf{Y}'_k + (\mathbf{Y}'_k)^T\} & \text{Re}\{\mathbf{Y}'_k - (\mathbf{Y}'_k)^T\} \\ \text{Re}\{(\mathbf{Y}'_k)^T - \mathbf{Y}'_k\} & \text{Im}\{\mathbf{Y}'_k + (\mathbf{Y}'_k)^T\} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U}(t) := \begin{bmatrix} \text{Re}(\dot{\mathbf{V}}(t)) \\ \text{Im}(\dot{\mathbf{V}}(t)) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{W}(t) := \mathbf{U}(t)\mathbf{U}(t)^T$$

$$a_{l0}(t) := c_{l1} [\text{tr}\{\mathbf{Y}_l \mathbf{W}(t)\} + r_l^c(t) - r_l^d(t) + P_l^d(t)] + c_{l0} - \alpha_l(t)$$

$$a_{l1}(t) := \sqrt{c_{l2}} [\text{tr}\{\mathbf{Y}_l \mathbf{W}(t)\} + r_l^c(t) - r_l^d(t) + P_l^d(t)]$$

其中,  $\mathbf{e}_k (k=1, \dots, n)$  表示  $n$  维空间的标准正交基。基于类似于文献[17]附录中的推导, 可以将问题(13)等效变换成如下形式:

$$\varphi = \min_{W(t), \alpha(t), b(t), r^c(t), r^d(t), s(t)} \left( \sum_{t=1}^T \sum_{l \in G} \alpha_l(t) + \sum_{k \in E} c_k \Delta g_k \right) \quad (14)$$

s.t.

$$\begin{aligned} P_k^{\min} - P_k^d(t) &\leq \text{tr}\{\mathbf{Y}_k \mathbf{W}(t)\} + r_k^c(t) - \\ r_k^d(t) &\leq P_k^{\max} - P_k^d(t) \end{aligned} \quad (15)$$

$$Q_k^{\min} - Q_k^d(t) \leq \text{tr}\{Y_k W(t)\} + s_k(t) \leq Q_k^{\max} - Q_k^d(t) \quad (16)$$

$$(V_k^{\min})^2 \leq \text{tr}\{M_k W(t)\} \leq (V_k^{\max})^2 \quad (17)$$

$$B_k^{\min} \leq b_k(t) \leq B_k^{\max} \quad (18)$$

$$R_k^{c,\min} \leq r_k^c(t) \leq R_k^{c,\max} \quad (19)$$

$$R_k^{d,\min} \leq r_k^d(t) \leq R_k^{d,\max} \quad (20)$$

$$S_k^{\min} \leq s_k(t) \leq S_k^{\max} \quad (21)$$

$$b_k(t+1) = b_k(t) + r_k^c(t)\eta_k^c - r_k^d(t)/\eta_k^d \quad (22)$$

$$b_k(1) = g_k \quad (23)$$

$$g_k - \Delta g_k \leq b_k(T+1) \leq g_k + \Delta g_k \quad (24)$$

$$\Delta g_k \geq 0 \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} a_{l0}(t) & a_{l1}(t) \\ a_{l1}(t) & -1 \end{bmatrix} \leq 0 \quad (26)$$

$$W(t) \geq 0 \quad (27)$$

$$\text{rank}(W(t)) = 1 \quad (28)$$

式(15)~式(17), 式(19)~式(22), 式(26)~式(28)中  $t=1, \dots, T$ , 式(18)中  $t=1, \dots, T+1$ 。其中, 约束式(26)是  $f_i(P_i^s(t)) \leq \alpha_i(t)$  的等效, 约束式(27)、式(28)是  $W(t) := U(t)U(t)^T$  的等效<sup>[17]</sup>。变换后的问题式(14)~式(28)的目标函数呈线性, 约束条件中除式(28)以外均为凸约束。

## 2.2 Lagrange 松弛与对偶问题

如果松弛掉关于矩阵秩的约束(28), 那么式(14)~式(27)所描述的问题是一个半正定规划问题<sup>[17]</sup>。通过引入相应约束的 Lagrange 乘子并进行一定的化简<sup>[1]</sup>, 可以形成该半正定规划的 Lagrange 对偶问题:

$$\varphi^* = \max_{x \geq 0, z, \sigma, \beta, \Delta \geq 0} h(x, z, \sigma, \beta, \Delta) \quad (29)$$

s.t.

$$A(t) \geq 0 \quad (30)$$

$$H_k(t) + \xi_k^{\max}(t) - \xi_k^{\min}(t) = 0 \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \Lambda_k(t) + \rho_k^{\max}(t) - \rho_k^{\min}(t) + \\ \sigma_k(t+1)\eta^c = 0 \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} -\Lambda_k(t) + \theta_k^{\max}(t) - \theta_k^{\min}(t) + \\ \sigma_k(t+1)/\eta^d = 0 \end{aligned} \quad (33)$$

$$\gamma_k^{\max}(t) - \gamma_k^{\min}(t) + \sigma_k(t+1) - \sigma_k(t) = 0 \quad (34)$$

$$\gamma_k^{\max}(1) - \gamma_k^{\min}(1) + \sigma_k(2) + \beta_k = 0 \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \gamma_k^{\max}(T+1) - \gamma_k^{\min}(T+1) - \sigma_k(T+1) - \\ \delta_k^{\min} + \delta_k^{\max} = 0 \end{aligned} \quad (36)$$

$$c_k - \delta_k^{\min} - \delta_k^{\max} - \delta_k = 0 \quad (37)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & z_{l1}(t) \\ z_{l1}(t) & z_{l2}(t) \end{bmatrix} \geq 0 \quad (38)$$

其中,

$$\Lambda_k(t) := \begin{cases} \lambda_k^{\max}(t) - \lambda_k^{\min}(t) + \\ c_{k1} + 2\sqrt{c_{k2}} z_{k1}(t) & k \in G \\ \lambda_k^{\max}(t) - \lambda_k^{\min}(t) & k \in N/G \end{cases}$$

$$H_k(t) := \eta_k^{\max}(t) - \eta_k^{\min}(t) \quad k \in N$$

$$Y_k(t) := \mu_k^{\max}(t) - \mu_k^{\min}(t) \quad k \in N$$

$$h(x, z, \sigma, \beta, \Delta) = \sum_{t=1}^T \sum_{l \in G} (c_{l0} - r_{l2}) -$$

$$\begin{aligned} & \sum_{k \in N} (\beta_k - \delta_k^{\min} + \delta_k^{\max}) g_k + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{k \in N} \{ \Lambda_k(t) P_k^d(t) + H_k(t) Q_k^d(t) + \\ & \lambda_k^{\min}(t) P_k^{\min} - \lambda_k^{\max}(t) P_k^{\max} + \\ & \eta_k^{\min}(t) Q_k^{\min} - \eta_k^{\max}(t) Q_k^{\max} + \\ & \mu_k^{\min}(t) (V_k^{\min})^2 - \mu_k^{\max}(t) (V_k^{\max})^2 + \\ & \rho_k^{\min}(t) R_k^{c,\min} - \rho_k^{\max}(t) R_k^{c,\max} + \\ & \theta_k^{\min}(t) R_k^{d,\min} - \theta_k^{\max}(t) R_k^{d,\max} + \\ & \xi_k^{\min}(t) S_k^{\min} - \xi_k^{\max}(t) S_k^{\max} \} + \\ & \sum_{t=1}^{T+1} \sum_{k \in N} \gamma_k^{\min}(t) B_k^{\min} - \gamma_k^{\max}(t) B_k^{\max} \end{aligned}$$

$$A(t) = \sum_{k=1}^n \Lambda_k(t) Y_k + H_k(t) \bar{Y}_k + Y_k(t) M_k。$$

约束式(30)~式(33)及式(38)中  $t=1, \dots, T$ , 约束式(34)中  $t=2, \dots, T$ 。其决策变量

$$\begin{aligned} x(t) := & [\lambda^{\min}(t)^T, \lambda^{\max}(t)^T, \eta^{\min}(t)^T, \eta^{\max}(t)^T, \\ & \mu^{\min}(t)^T, \mu^{\max}(t)^T, \gamma^{\min}(t)^T, \gamma^{\max}(t)^T, \\ & \rho^{\min}(t)^T, \rho^{\max}(t)^T, \theta^{\min}(t)^T, \theta^{\max}(t)^T, \\ & \xi^{\min}(t)^T, \xi^{\max}(t)^T]^T \end{aligned}$$

$$z_l(t) := [z_{l1}(t), z_{l2}(t)]^T \quad l \in G$$

$$\Delta := [(\delta^{\max})^T, (\delta^{\min})^T, \delta^T]^T$$

以及  $\sigma, \beta$  即为约束式(15)~式(27)的 Lagrange 乘子<sup>[21]</sup>。可以通过与文献[17,21]中类似的步骤证明, 在满足条件1或条件2的情况下, 对偶问题与原 OPF 问题式(13)互为对偶问题, 且对偶间隙为零。

条件1 (充要条件): 存在对偶问题的最优解, 使得对  $t=1, \dots, T$ , 最优解对应的  $A^{\text{opt}}(t)$  有 2 重零特征根。

条件2 (充分条件): 由系统导纳矩阵的实部  $\text{Re}\{Y\}$  生成的图是强连接的。

对于实际系统而言, 线路的阻抗值大于零, 因此充分条件2是容易满足的, 进而充要条件1也易于满足。

### 2.3 原问题的最优解

当对偶问题式(29)~式(38)存在最优解时, 在求得对偶问题最优解的基础上, 可以按以下步骤得到原 OPF 问题的最优解。

(1) 对  $t=1, \dots, T$ , 求出对偶问题最优解  $(x^{\text{opt}}(t), z^{\text{opt}}(t), \sigma^{\text{opt}}(t), \beta^{\text{opt}}, \Delta^{\text{opt}})$  对应的半正定矩阵  $A^{\text{opt}}(t)$ 。

(2) 求得  $A^{\text{opt}}(t)$  的化零空间中任一非零向量  $[U_1(t)^T, U_2(t)^T]^T$ , 则原 OPF 问题的节点电压最优值可表示为

$$\dot{V}^{\text{opt}}(t) = (\zeta_1(t) + \zeta_2(t)i)(U_1(t) + U_2(t)i) \quad (39)$$

其中,  $\zeta_1(t), \zeta_2(t)$  的值可以通过原 OPF 问题的一阶 KKT 条件或平衡节点条件确定<sup>[21]</sup>。

(3) 验证  $\dot{V}^{\text{opt}}(t)$  满足原 OPF 问题的约束, 由此判断强对偶关系成立<sup>[21]</sup>。

(4) 在此基础上计算原 OPF 问题取得最优解时的节点注入电流和节点注入功率, 进而求得其他变量的最优值。

## 3 算例测试

在本部分中通过两个算例对上述模型和算法进行测试, 算例1通过 IEEE 9 节点系统模拟抽水蓄能系统的单点接入, 算例2通过 IEEE 57 节点系统模拟电池储能系统的多点接入。两类储能系统的参数在表3中给出, 表3中符号的含义与表1一致。以实际系统历史负荷数据为基础模拟全天 24 h 的负荷需求变化, 系统功率基值选取为 100 MVA。

算例测试采用以下软件:

(1) 采用 Matlab 中的工具包 YALMIP<sup>[22]</sup> 输入对偶问题模型, 调用 SEDUMI 优化工具包求解;

(2) 采用 MATPOWER 工具包的扩展 OPF 功能<sup>[23-24]</sup> (内点法) 求解原问题, 用以进行结果对照,

IEEE 测试系统参数也由此工具包中的数据文件获得。

在 MATPOWER 文件中, 变压器内阻为零的假设可能导致系统不满足条件2。此时在相应支路上增加一小阻抗 ( $10^{-5}$  p.u.), 即可使条件2得到满足<sup>[14]</sup>, 进而满足条件1。

表3 两类储能系统参数  
Table 3 Parameters of two types of ESS

参数符号	参数 单位	参数取值	
		抽水蓄能系统	电池储能系统
$B_k^{\max}, B_k^{\min}$	MWh	1 240, 124	40, 4
$g_k$	MWh	310	12
$R_k^{c,\max}, R_k^{c,\min}$	MW	100, 0	10, 0
$R_k^{d,\max}, R_k^{d,\min}$	MW	100, 0	10, 0
$S_k^{\max}, S_k^{\min}$	Mvar	90, -90	10, -10
$\eta_k^c$	%	92	95
$\eta_k^d$	%	80	92

### 3.1 储能系统的单点接入

以 IEEE 9 节点系统为基础, 在 5 号节点处接入抽水蓄能系统, 网络拓扑结构如图2所示。在不松弛最末时刻剩余存储能量情况下, 采用本文提出的算法与内点法求解得到的发电成本在表4中给出。

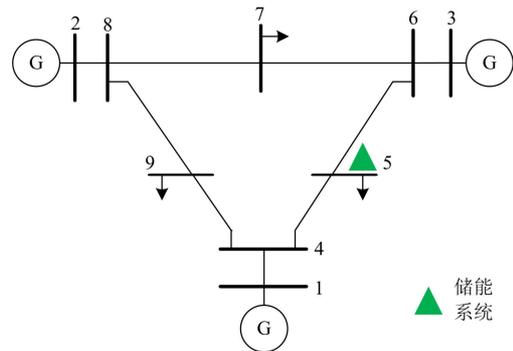


图2 IEEE 9 节点系统

Fig. 2 IEEE 9-bus system

表4 不同算法得到的发电成本  
Table 4 Generation costs obtained by different methods

	发电成本/\$		相差量/%
	本文提出的算法	内点法	
含储能情况	$1.3019 \times 10^5$	$1.3022 \times 10^5$	0.02
不含储能情况	$1.3082 \times 10^5$	$1.3082 \times 10^5$	0.00

可以看到, 采用本文提出的算法与采用内点法求解得到的发电成本接近, 在含储能系统的情况下相差约为 0.02%, 在不含储能系统的情况下所得结果基本相等。

图 3 中给出了储能系统参与运行前后的机组出力变化。图中显示储能系统通过在负荷高峰时段吸收有功，在负荷低谷时段释放有功平滑了机组出力，使得能量得到了更有效的利用。

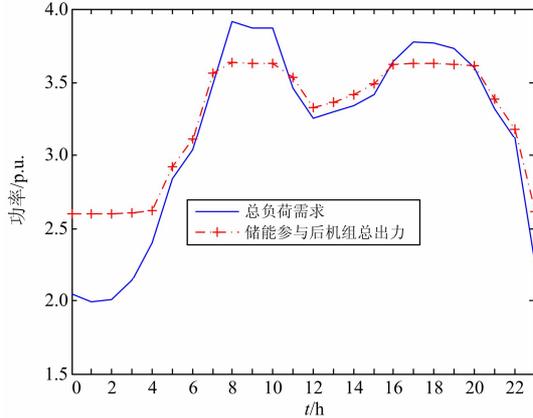


图 3 储能系统参与运行前后的机组出力变化  
Fig. 3 Output of units before and after considering ESS

图 4 中展示了储能系统全天有功功率变化和能量变化，在这里有功功率大于零表示储能系统吸收有功，有功功率小于零表示储能系统释放有功。不难发现，有功功率大于零时储能系统的能量呈增加趋势，反之则趋于减少。在图 4 中，储能系统全天有功功率与时间轴围出的面积表示了储能系统实际吸收（时间轴以上面积）与释放（时间轴以下面积）的能量大小。经过计算得到，储能系统全天吸收有功 236 MWh，释放有功 174 MWh，即全天有功损耗 62 MWh，占吸收能量的 26.3%。这部分损耗是由于储能系统的效率小于 1 造成的。

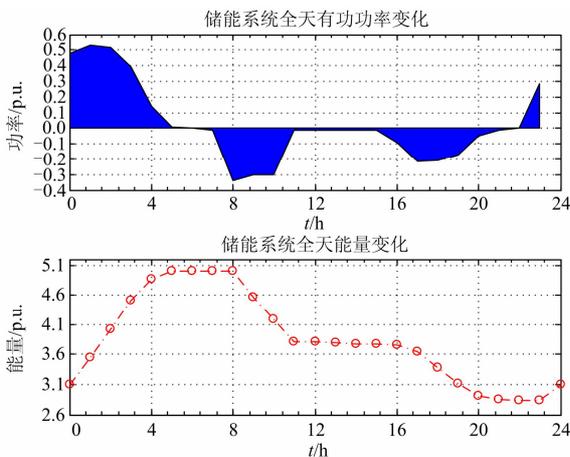


图 4 储能系统 24 h 有功功率和能量变化  
Fig. 4 Active power and energy of ESS in 24 hours

图 5 中显示了滚动优化对储能系统运行安排的影响。通过滚动优化，在每时段的优化计算启动前，目标函数中的惩罚系数  $c_k$  根据储能系统单位吸收/

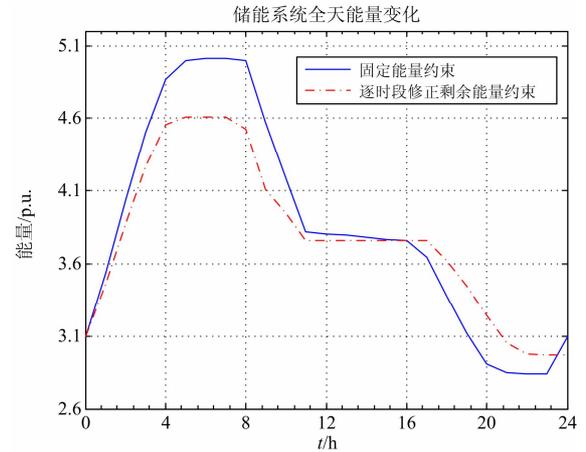


图 5 逐时段修正约束对运行结果的影响  
Fig. 5 Impact of constraints correction on result

释放能量对传统机组发电费用的减少量被修正，如式(40)所示。

$$c_k = \alpha \frac{\Delta C}{E_{total}} \quad (40)$$

其中： $\Delta C$  表示储能系统的参与对传统机组发电费用的减少量； $E_{total}$  表示储能系统吸收或释放的总能量； $\alpha$  为比例系数。惩罚系数  $c_k$  与储能系统吸收/释放能量的平均效益成反比，平均效益越高，惩罚系数越小，储能系统的运行越灵活；平均效益越低，惩罚系数越大，储能系统受到的约束越严格。从图中可以看到，相对于固定剩余能量约束的情况，对模型的逐时段修正使得储能系统的能量分布区间更为集中，减少了能量存储与释放过程中的损耗，进而提高了储能的利用效率。相比于固定剩余能量约束的算法，采用滚动优化方法通过对模型的逐时段修正，使全天系统发电成本进一步降低 140 美元。

### 3.2 储能系统的多点接入

以 IEEE 57 节点系统为基础，在节点 4、14、20、25、30、35、40、45、50、55 接入 10 个电池储能系统，总容量为 100 MW。在不松弛最末时刻剩余存储能量的情况下，采用本文提出的算法与内点法求解得到的发电成本在表 5 中给出。可以看到，采用本文提出的算法与采用内点法求解得到的发电成本接近，在含储能系统的情况下相差约为 0.01%，在不含储能系统的情况下相差约为 0.02%。在含储能系统的情况下，电池储能系统的全天能量变化如

表 5 不同算法得到的发电成本  
Table 5 Generation costs obtained by different methods

	发电成本/美元		相差量/%
	本文提出的算法	内点法	
含储能情况	$7.3718 \times 10^5$	$7.3726 \times 10^5$	0.01
不含储能情况	$7.4009 \times 10^5$	$7.4022 \times 10^5$	0.02

图 6 所示, 储能系统的能量变化不仅和时间有关, 也和接入的位置有关。

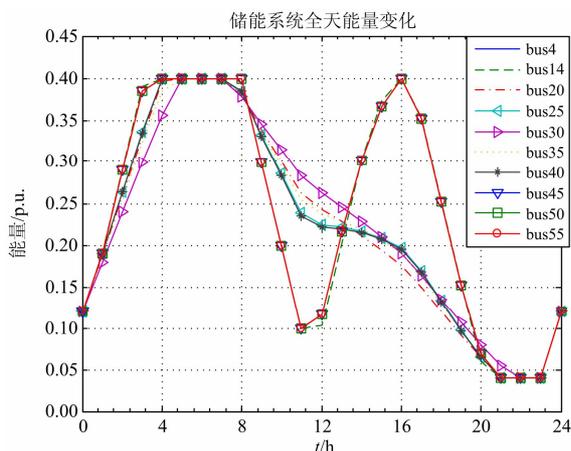


图 6 储能系统 24 h 能量变化  
Fig. 6 Energy of ESS in 24 hours

#### 4 结论

本文提出了一种含储能系统多时段最优潮流的实施思路, 在储能系统细化模型的基础上, 建立了考虑规模化储能系统的多时段最优潮流模型。该模型中考虑了能量存储与释放的效率, 并通过对剩余能量约束松弛与逐时段修正, 既保证了储能系统的循环运行, 又提高了储能的利用效率。

不同于传统的最优潮流解法, 本文通过等效变换与 Lagrange 松弛推导出其对偶问题进行求解。该对偶问题是一个凸的半正定规划, 且在一定条件下对偶间隙为零, 有效提高了求解效率。

文中对储能系统单点接入和多点接入的算例进行了测试, 并与内点法计算的结果进行了比较, 测试结果证明了所提模型和算法准确有效, 也验证了储能系统的参与使得全天各个时段之间的潮流分布产生了耦合作用, 即通过把电能负荷高峰时段存储, 在负荷低谷时段释放, 平衡了负荷分布, 降低了发电成本。在下一步研究中将考虑新能源发电参与后, 其不确定性对含储能系统 OPF 的影响。

#### 参考文献

[1] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.  
ZHANG Wen-liang, QIU Ming, LAI Xiao-kang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9.

[2] CHEN H, CONG T N, YANG W, et al. Progress in electrical energy storage system: a critical review[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(3): 291-312.

[3] CONNOLLY D. A review of energy storage technologies[D]. Limerick: University of Limerick, 2009: 6-13.

[4] DÍAZ-GONZÁLEZ F, SUMPER A, GOMIS-BELLMUNT O, et al. A review of energy storage technologies for wind power applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4): 2154-2171.

[5] 戴兴建, 邓占峰, 刘刚, 等. 大容量先进飞轮储能电源技术发展状况[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 133-140.  
DAI Xing-jian, DENG Zhan-feng, LIU Gang, et al. Review on advanced flywheel energy storage system with large scale[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 133-140.

[6] 任桂周, 常思勤. 一种基于超级电容器组串并联切换的储能系统[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 187-195.  
REN Gui-zhou, CHANG Si-qin. An energy storage system based on series-parallel switchover of ultra-capacitor banks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 187-195.

[7] 褚晓广, 张承慧, 李珂, 等. 基于涡旋机的新型压缩空气储能系统动态建模与效率分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 126-132.  
CHU Xiao-guang, ZHANG Cheng-hui, LI Ke, et al. Dynamic modeling and efficiency analysis of compressed air energy storage system equipped with scroll compressor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 126-132.

[8] 刘世林, 文劲宇, 孙海顺, 等. 风电并网中的储能技术研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 145-153.  
LIU Shi-lin, WEN Jin-yu, SUN Hai-shun, et al. Progress on applications of energy storage technology in wind power integrated to the grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 145-153.

[9] 黄羚, 蔡涛, 陈天锦, 等. 基于 SOC 调整的光伏电站储能系统调控策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 66-70.  
HUANG Ling, CAI Tao, CHEN Tian-jin, et al. Control strategy of battery energy storage system for large-scale PV system based on SOC adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 66-70.

[10] 杨秀, 陈洁, 朱兰, 等. 基于经济调度的微网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 53-60.  
YANG Xiu, CHEN Jie, ZHU Lan, et al. Optimization allocation of energy storage for microgrid based on

- economic dispatch[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(1): 53-60.
- [11] 饶成诚, 王海云, 王维庆, 等. 基于储能装置的柔性直流输电技术提高大规模风电系统稳定运行能力的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(4): 1-7.  
RAO Cheng-cheng, WANG Hai-yun, WANG Wei-qing, et al. Enhancement of the stable operation ability of large-scale wind power system based on the VSC-HVDC embedded in energy storage apparatus[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(4): 1-7.
- [12] 施琳, 罗毅, 涂光瑜, 等. 考虑风电场可调度性的储能容量配置方法[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(5): 120-127.  
SHI Lin, LUO Yi, TU Guang-yu, et al. Energy storage sizing method considering dispatchability of wind farm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(5): 120-127.
- [13] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.  
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun, YAN Zheng. *Advanced power system network analysis*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [14] LAVAEI J, LOW S H. Convexification of optimal power flow problem[C] // *Communication, Control, and Computing (Allerton)*, 2010 48th Annual Allerton Conference on, 2010 IEEE, IEEE, 2010: 223-232.
- [15] 史继莉, 邱晓燕. 人工智能在最优潮流中的应用综述[J]. *继电器*, 2005, 33(16): 85-89.  
SHI Ji-li, QIU Xiao-yan. Artificial intelligence applications in optimal power flow[J]. *Relay*, 2005, 33(16): 85-89.
- [16] JIANG Q, CHIANG H D. A sequential feasible optimal power flow in power systems[C] // *Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, IEEE, 2008: 1-6.
- [17] LAVAEI J, LOW S H. Zero duality gap in optimal power flow problem[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2012, 27(1): 92-107.
- [18] CHANDY K M, LOW S H, TOPCU U, et al. A simple optimal power flow model with energy storage[C] // *Decision and Control (CDC)*, 2010 49th IEEE Conference on, IEEE, 2010: 1051-1057.
- [19] LAMADRID A J, MOUNT T D, SHOEMAKER C. Dynamic optimization for the management of stochastic generation and storage[C] // *Transmission and Distribution Conference and Exposition, Latin America (T&D-LA)*, 2010 IEEE/PES, IEEE, 2010: 860-866.
- [20] LEVRON Y, GUERRERO J M, BECK Y. Optimal power flow in microgrids with energy storage[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2013, 28(3): 3226-3234.
- [21] GAYME D, TOPCU U. Optimal power flow with large-scale storage integration[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2013, 28(2): 709-717.
- [22] LOFBERG J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB[C] // *Computer Aided Control Systems Design*, 2004 IEEE International Symposium on, IEEE, 2004: 284-289.
- [23] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SÁNCHEZ C E. MATPOWER 4.1 user's manual[J]. *Power Systems Engineering Research Center (PSERC)*, 2011.
- [24] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SÁNCHEZ C E, THOMAS R J. MATPOWER's extensible optimal power flow architecture[C] // *Power & Energy Society General Meeting*, 2009. PES'09 IEEE, IEEE, 2009: 1-7.

收稿日期: 2014-05-27

作者简介:

高戈(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为考虑储能系统参与的经济调度;

胡泽春(1979-), 男, 通信作者, 副教授, 主要研究方向包括电力系统优化规划与运行、智能电网、电力市场、电动汽车等。E-mail: zechhu@tsinghua.edu.cn