

考虑供电可靠性的电池储能系统削峰填谷策略研究

考虑储能系统的充放电特性,根据电力系统所需要提高供电可靠性,结合随机生产模拟中得到的等效负荷持续曲线,确定储能系统的额定充放电功率和容量,在随机生产模拟计算中,考虑了表征供电可靠性的两个指标:电力不足概率(Loss of Load Probability, LOLP)和电量不足期望值(Energy Expectation not Served, EENS)。采用负荷标准差与电费综合评价削峰填谷的效果,以这两个指标作为削峰填谷优化数学模型的目标函数,通过不同权重评价两者削峰填谷的效果。最后,计算了储能系统充放电后的系统负荷峰谷相关参数,并进行了算例仿真验证。表明采用本文提出的根据削峰填谷优化效果数学模型,制定的储能系统充放电策略,可实现储能系统提高可靠性的同时,满足对系统负荷削峰填谷的应用需求。

宁阳天¹ 李相俊² 麻秀范¹ 惠 东²/1.华北电力大学电气与电子工程学院
2.中国电力科学研究院电工与新材料研究所

随着电网的不断发展,地区配电网用电高峰负荷和峰谷差的不断增大,单纯地扩大系统装机容量和电网传输容量已不是现今电网发展的最优模式^[1],因此电力系统削峰填谷成为了电力工业的重要研究课题之一。实施削峰填谷对于供电企业的作用是多方面的:削减调峰压力,提高设备利用率和供电可靠性,降低损耗,延缓投资等^[2]。原有的削峰填谷多采用电力需求侧管理,通过有效的激励、经济手段等改变用户的用电方式来实现^[3-5]。此外,抽水蓄能电站进行削峰填谷也得到了广泛的应用^[6]。随着电力电子、材料学等学科的发展,现代先进储能技术已经得到了一定程度的发展^[7]。

国家自然科学基金项目(51107126),国家电网公司科技项目(DG71-12-002, DG71-12-012)。

先进储能技术可用于削峰填谷,减少城市用电的峰谷差,既减少再建电厂的投资,又可避免谷值时系统闲置容量过大所导致的发电机组总体经济性下降、煤耗增加。先进储能技术主要指压缩空气储能、飞轮储能等机械储能;铅酸、镍隔、锂离子、钠硫和液流等电池储能;超导、超级电容和高能密度电容储能等电磁储能;熔盐储能和热电储能等热力储能^[8]。而先进储能技术中,目前用于削峰填谷的主要是电池储能技术^[7]。国内外都在大力研究储能系统,如美国、日本等国家已有电池储能系统用于削峰填谷的试验工程;中国国家电网在河北张北地区建立了风光储输示范工程,可用于研究储能系统的相关特性和应用,应用包括平滑风光出力波动、跟踪发电计划和参与系统调频调压等^[11-12];中国南方电网建立了5 MW级电池储能站,并在深圳并网成功,用于对某变电站所承担的负荷进行削峰填谷。由于现阶段的储能系统容量还较小,因此本论文针对配电网系统的负荷进行削峰填谷研究。

电力系统生产模拟是在预测负荷曲线下,考虑负荷的随机波动和机组随机停运,利用计算机模拟电力系统的发电调度,预测各发电机组的发电量及燃料耗量,分析发电成本和评估系统的供电可靠性。它对提高电力系统运行的经济效益和供电可靠性水平,评估未来电力系统的发展有着极为重要的意义^[9]。随机生产模拟作为电力系统运行和规划的重要工具,通过随机生产模拟的计算可



宁阳天/硕士研究生

关键词/Keywords

储能系统·
随机生产模拟·
供电可靠性·
分时电价·
削峰填谷·
充放电策略·

获得电力系统的两个可靠性指标：电力不足概率（Loss of Load Probability, LOLP）和电量不足期望值（Expected Energy not Served, EENS）^[10]。

在采用储能进行削峰填谷时，削峰填谷效果的评价主要集中在经济性上，文献[11]提出了一种储能系统应用于孤岛电力系统的削峰填谷时的经济评价方法，在孤岛电力系统对储能系统集中调度的前提下，建立了按一周为尺度进行经济上优化的数学模型。文献[12]以最小化储能系统能量成本和峰值负荷成本为目标函数，从而制定出充放电策略，以进行削峰填谷。文献[13]从储能系统所有者收益的角度制定充放电策略，并对储能系统容量的配置进行了优化。还有文献以最小化负荷方差作为目标函数，同时配合储能物理约束作为约束条件构成整个数学模型，在对该模型进行求解过程中，制定出储能系统的充放电策略。以上文献均仅从经济或负荷角度考虑削峰填谷的效果，并没有把两者结合起来。

削峰填谷主要出于两方面的目标：一是经济性；二是可靠性。目前对于削峰填谷的研究主要着眼于经济性。本文根据随机生产模拟计算出来的两个指标EENS、LOLP，从提高电力系统的可靠性出发，结合等效持续负荷曲线，确定储能系统的功率和容量。然后通过负荷标准差和分时电价造成的成本差异评价削峰填谷的效果，从而制定储能系统充放电策略，以实现削峰填谷。

确定储能系统参数

1. 随机生产模拟的基本原理

等效持续负荷曲线（Equivalent Load Duration Curve, ELDC）是随机生产模拟中最为重要的概念，随机生产模拟的各类方法都是在此基础上建立和发展起来的^[10]。本文通过该曲线确定储能系统的充放电功率及容量。

图1^[10]为持续负荷曲线，图中横坐标为系统负荷，纵坐标为负荷的持续时间， T 为模拟周期，模拟周期根据具体的需要而定，曲线上任意一点 (P, t) 表示系统负荷大于或等于负荷 P 的持续时间 t ，即 $t = F(P)$ 。

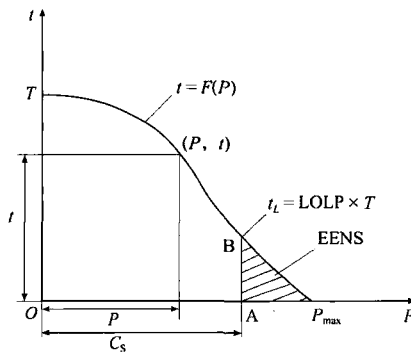


图1 持续负荷曲线

用持续时间 t 除以周期 T ，得到

$$p = f(P) = F(P) / T \quad (1)$$

式中， p 为系统负荷大于或等于 P 的概率。

设系统在模拟周期 T 内投入运行的发电机总容量为 C_s ，由图1得，系统负荷大于发电机总容量的持续时间为

$$t_L = F(C_s) \quad (2)$$

从而得到电力不足概率LOLP为

$$\text{LOLP} = \frac{t_L}{T} = f(C_s) \quad (3)$$

而相应的，系统负荷大于发电机总容量时，即发电机无法满足图1中的阴影部分的负荷需求，从而得到相应的电量不足期望值

$$\text{EENS} = \int_{C_s}^{P_{\max}} F(P) dP = T \int_{C_s}^{P_{\max}} f(P) dP \quad (4)$$

但由于发电机组可能出现随机停运。因此，需要考虑各个发电机组的随机停运，对原始持续负荷曲线进行修正，从而得到考虑机组随机停运的等效持续负荷曲线。在修正曲线时，引入卷积的概念。

因此考虑其停运时，第 i 台机组加载后的等效持续负荷曲线变为

$$f^{(i)}(P) = p_i f^{(i-1)}(P) + q_i f^{(i-1)}(P - C_i) \quad (5)$$

式中， C_i 为第 i 台机组的额定容量； p_i 为第 i 台机组的可用率； $q_i = 1 - p_i$ ，为故障停运率。假设系统中有 n 台发电机，当所有发电机组全部卷积后，即可得到最终的等效持续负荷曲线 $f^{(n)}(P)$ ，此时再采用式(3)、式(4)即可得到EENS、LOLP。

上述随机生产模拟过程的函数均为连续性函

数,但在实际中由于负荷的测量和预测均不可能连续,而是一系列离散的点,因此在进行随机生产模拟时,也采用离散化方法。如图2所示,持续负荷曲线是阶梯状的曲线。

结合随机生产模拟制定储能系统的充放电策略时,首先需要确定储能系统的放电功率。根据对提高供电可靠性的不同要求,可分为降低电力不足概率和电量不足期望值两个指标,降低的指标不同,放电功率确定方法也不相同。

2. 确定储能系统放电功率

降低LOLP时,放电功率确定方法如下:如图2所示,当LOLP从LOLP₀降低到LOLP₁时,即从A点到C点,储能系统所需配备的放电功率为 P_{dis} 。

而对于放电电量,计算出横线阴影部分所代表的面积ABCD,即可得到放电电量 E_{dis} 。

此时相应的EENS降为

$$EENS_1 = EENS_0 - E_{dis} \quad (6)$$

式中, $EENS_0$ 、 $EENS_1$ 为降低前后的EENS。

降低EENS时,放电功率确定方法如下:如图2所示, $EENS$ 为总的阴影部分所代表的面积,当 $EENS$ 减少 $\Delta EENS$,即横线阴影部分所围成的面积,从 $EENS_0$ 降低到 $EENS_1$ 时,放电电量

$$E_{dis} = \Delta EENS \quad (7)$$

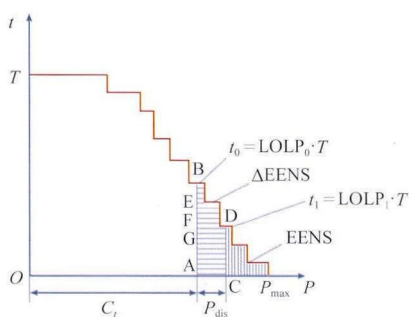


图2 储能系统放电策略制定示意图

在图2中确定放电电量 E_{dis} 后即可确定放电功率 P_{dis} 。同时根据确定的D点位置,可得到此时相应的LOLP

$$LOLP_1 = t_s / T \quad (8)$$

在确定了放电功率后,为了保证一定的裕度,储能系统的额定放电功率为

$$P_{dis,r} = P_{dis} / (1 - \alpha_{dis}) \quad (9)$$

式中, $P_{dis,r}$ 为储能系统的额定放电功率; α_{dis} 为放电时的裕度系数。

3. 确定储能系统充电功率

由于储能系统充放电过程有一定的电能损耗,为了保证提高供电可靠性时有足够的放电电量,储能系统的额定存储能量需要大于放电电量。储能系统额定容量为

$$E_{ess} = (1 + \beta) E_{dis} / (1 - \gamma) \quad (10)$$

式中, γ 为充放电损耗率; β 为裕度系数。

而存储的电量达到即可,根据下式得到

$$E_{ch} = E_{dis} / (1 - \gamma) \quad (11)$$

为了简化充电过程,保证储能系统存储的电量达到,充电功率设定如下

$$P_{ch} = P_{dis} / (1 - \gamma) \quad (12)$$

储能系统的额定充电功率的选取需要考虑一定的裕度,额定充电功率如下

$$P_{ch,r} = P_{ch} / (1 - \alpha_{ch}) \quad (13)$$

式中, $P_{ch,r}$ 为储能系统的额定充电功率; α_{ch} 为充电时的裕度系数。

削峰填谷数学优化模型

若储能系统的拥有者为电力用户,在市场电价体系下,用户的目标为最大化储能系统给用户带来的经济利益;若储能系统的拥有者为电网,为了减少常规发电机组的开停机次数以及旋转备用的容量,电网的目标为负荷曲线尽量平坦。在数学上,标准差可以反映随机变量偏离其均值的程度,因此负荷标准差可以反映负荷曲线的平坦程度。

1. 目标函数

一方面,从电网运营者的角度出发,为了减少发电机组的起停次数以及保证发电机组的平稳运行,需要减小负荷波动以及峰谷差,负荷标准差及峰谷差这两个指标越小越有利于其机组的稳定运行。采用标准差即可评价其负荷波动水平的大小,而波动越小,各时段负荷与负荷平均值之差越小,从而负荷峰谷差也越小,因此采用负荷标准差作为目标函数即可同时实现上述两个目标。

另一方面,在电力市场环境存在分时电

价, 不同时段电价不同, 从经济性的角度需要考虑电价水平对储能充放电的影响。

因此, 本文以两个指标作为优化目标设置目标函数。目标函数如下

$$\min F = \omega_1 F_1 + \omega_2 F_2 \quad (14)$$

$$F_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^T (P_{\text{load},i} - P_{\text{bess},i} - P'_{\text{av}})^2} \quad (15)$$

$$P'_{\text{av}} = \sum_{i=1}^T (P_{\text{load},i} - P_{\text{bess},i}) / T \quad (16)$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^T [p_i (P_{\text{load},i} - P_{\text{bess},i})] \quad (17)$$

式中, $P_{\text{load},i}$ 为第 i 时段的负荷值; $P_{\text{bess},i}$ 为第 i 时段的电池储能系统充放电功率, 充电时为负值, 放电时为正值, 当等于零时, 表示储能电池处于浮充状态; P'_{av} 为储能充放电后负荷的平均值; p_i 为第 i 时段的电价; ω_1, ω_2 为权重, $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。目标函数表达式 (14) 中包含了两部分: 右端第一项 F_1 表示经过储能系统优化后负荷的标准差; 第二项表示优化时段内总的电费支出。

2. 约束条件

采用电池储能系统进行充放电操作时, 需要考虑其物理约束, 包括以下两方面的约束。

(1) 充放电功率约束

$$P_{\text{bess},\min} \leq P_{\text{bess},i} \leq P_{\text{bess},\max} \quad (18)$$

$$P_{\text{bess},\min} = P_{\text{bess},\max}^{\text{ch}} \quad (19)$$

$$P_{\text{bess},\max} = P_{\text{bess},\max}^{\text{dis}} \quad (20)$$

式中, $P_{\text{bess},\max}^{\text{dis}}$ 为放电功率的最大值; $P_{\text{bess},\max}^{\text{ch}}$ 为充电功率的最大值。

(2) 荷电状态约束

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_i \leq \text{SOC}_{\max} \quad (21)$$

SOC 求解公式为

$$\text{SOC}_i = \text{SOC}_{i-1} - \frac{P_{\text{bess},i} \Delta t}{S_{\text{rate}}} \quad (22)$$

式中, SOC_i 为第 i 时段的电池储能系统荷电状态; $\text{SOC}_{\max}, \text{SOC}_{\min}$ 分别为荷电状态的上下限; Δt 为充放电时间间隔; S_{rate} 为电池储能系统的额定储能容量。

3. 目标函数改进

在实际的优化过程中, 采用全天优化时, 由于该数学问题是高维、多约束的优化问题, 导

致优化得到的结果在非峰谷时段也存在充放电行为, 因此充放电时段根据以下步骤进行确定:

1) 计算一天负荷的平均值。

2) 低于负荷平均值一定百分比 (本文设定为 10%) 的设为谷时段, 储能系统仅进行充电操作。

3) 高于负荷平均值一定百分比 (本文设定为 10%) 的设为峰时段, 储能系统仅进行放电操作。

由于以货币计量时, 其计算得到的电费在数值上较小, 造成采用其作为目标函数的一部分时, 对计算结果影响不明显, 因此将电价做如下处理

$$p'_i = p_i / p_{\max} \quad (23)$$

式中, $p_{\max}$ 为一天中的最高电价, 得到的 p'_i 将 F_2 的 p_i 进行替代。

4. 模型求解算法

本优化问题是带约束的非线性规划问题, 本文中采用内点法进行求解。

内点法在求解迭代过程中, 始终在可行域内部进行, 当迭代过程中所得的可行解靠近边界时, 目标函数值增大, 保证新解始终在解空间中, 避免越限问题, 内点法求解步骤如下。

对于一个非线性约束优化问题 (在本文中即为, $\min F(P_{\text{bess}}) = \omega_1 F_1(P_{\text{bess}}) + \omega_2 F_2(P_{\text{bess}})$, P_{bess} 为 $P_{\text{bess},i} (i = 1, 2, \dots, T)$, $\{\min F(P_{\text{bess}}), g_j(P_{\text{bess}}) \geq 0, j = 1, \dots, m\}$ (j 表示优化问题的第 j 个约束条件) 可转化为如下的无约束非线性规划问题

$$\min_{X \in R_0} P(P_{\text{bess}}, r_k) \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (24)$$

其中

$$\bar{P}(P_{\text{bess}}, r_k) = F(P_{\text{bess}}) + r_k \sum_{j=1}^m \frac{1}{g_j(P_{\text{bess}})} \quad r_k > 0 \quad (25)$$

$$R_0 = \{P_{\text{bess}} | g_j(P_{\text{bess}}) > 0; j = 1, 2, \dots, m\} \quad (26)$$

内点法将约束条件转化为如式 (24) 中右端第二项, 即障碍项, r_k 称为障碍因子。由于障碍项的存在, 使得可行域 R 的边缘上至少存在一点 $g_j(P_{\text{bess}}) = 0$, 从而有 $\bar{P}(P_{\text{bess}}, r_k)$ 为无穷大。

从可行域内部的某一点 $X^{(0)}$ 出发, 按无约束极小化方法对式 (24) 进行迭代, 随着 r_k 的逐步减少 ($r_1 > r_2 > \dots > r_k \dots > 0$), 障碍项所起到的作用也

越来越小，因而所求出的 $\min_{x \in R_0} \bar{P}(P_{\text{bess}}, r_k)$ 的解 $P_{\text{bess}}(r_k)$ 也逐步逼近原问题的极小解 $P_{\text{bess}, \min}$ 。若原问题的极小解在可行域的边界上，则随着 r_k 的逐步减小所求出的障碍函数的极小解不断靠近边界，直至满足某一特定的准确度要求。

算例分析

1. 算例数据

配电网系统负荷数据引用于文献[14]，并将最大负荷修正为2 650 kW，电价数据引用于文献[15]，分时电价为丹麦的电价，故货币计量单位为欧元。如表1所示，为0:00~23:00的负荷数据和电价数据。配电网系统7机组系统，DG包括内燃机、燃气轮机、微型燃机和燃料电池，DG机组容量、可靠性引用于文献[16]，具体数量与相应参数如表2所示。储能系统的充放电损耗系数设定为0.1，裕度系数均取0.1。本文采用内点法求解削峰填谷数学优化模型时障碍因子 r_k 取0.1。

表1 负荷及电价数据

t/h	P/kW	p/€·(kW·h) ⁻¹	t/h	P/kW	p/€·(kW·h) ⁻¹
0	1 961	0.026 5	12	2 464.5	0.032 5
1	1 855	0.026 0	13	2 438	0.032 0
2	1 749	0.025 0	14	2 411.5	0.032 5
3	1 722.5	0.024 5	15	2 411.5	0.035 0
4	1 696	0.025 0	16	2 438	0.041 0
5	1 643	0.025 5	17	2 491	0.065 0
6	1 643	0.031 0	18	2 517.5	0.038 0
7	1 749	0.034 0	19	2 517.5	0.032 0
8	2 146.5	0.044 0	20	2 650	0.029 0
9	2 279	0.037 5	21	2 464.5	0.028 0
10	2 411.5	0.036 5	22	2 332	0.027 0
11	2 464.5	0.034 0	23	2 120	0.026 0

表2 机组数据

DG	数量/台	容量/kW	强迫停运率(%)
内燃机	2	500	5.2
燃气轮机	2	500	4.5
微型燃机	1	500	0.5
燃料电池	1	200	0.5

2. 算例结果

根据表1及表2数据按随机生产模拟计算得到

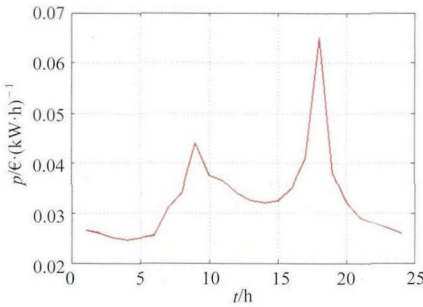


图3 分时电价图

未考虑储能系统削峰填谷的供电可靠性数据为：LOLP=0.112 3，EENS=771.61 kW·h。

通过储能系统放电提高供电可靠性时，由于两类指标是相互联系的，降低其中一个指标时，另一个指标也会有相应降低，因此在本文中分别按两类指标确定储能系统相关参数，可靠性提高方案如表3所示。

表3 确定储能系统参数方案

方案1	LOLP降低0.03
方案2	EENS降低500 kW

表4为分别根据降低LOLP和降低EENS确定的储能系统相关参数。为了说明按照LOLP和EENS确定储能系统充放电功率与容量对削峰填谷的不同，表5为根据表4得到的不同储能系统参数，完全以负荷标准差为目标函数时，计算得到的削峰前后相关指标进行对比。

表4 储能系统参数

	方案1	方案2
充电功率/kW	235.00	223.03
放电功率/kW	211.50	200.73
额定充电功率/kW	261.11	247.81
额定放电功率/kW	235.00	223.03
充电电量/kW·h	604.72	555.56
放电电量/kW·h	544.24	500.00
额定容量/kW·h	671.91	617.29

由于等效持续负荷曲线为离散化分布，因此按LOLP降低0.03确定储能系统参数，实际的LOLP降低值为0.038 1。

在使用内点法对本算例进行削峰填谷及经济性时，障碍因子初始取值为1。表6是目标函数

表5 削峰前后相关指标对比

	削峰前	削峰后	
		方案1	方案2
峰值/kW	2 650	2 438.5	2 449.27
谷值/kW	1 643	1 801.2	1 793.01
峰谷差/kW	1 007	637.48	656.26
峰谷差率(%)	38.00	26.14	26.79
EENS/kW·h	765.82	227.37	271.61
LOLP	0.112 3	0.074 2	0.095 4
负荷标准差/kW	340.23	278.30	282.99

中负荷标准差与用电费用之间取不同权重时的对比,为了更突出负荷标准差与电费这两个不同评价指标对削峰填谷的影响,在权重值设定时,选取单独采用某个指标及各占一半时的削峰填谷效果,此时储能系统参数选取根据LOLP确定的系统参数。

表6 不同权重下削峰填谷效果对比

方案	权重匹配	负荷标准差/kW	峰谷差/kW	电费/€
—	$\omega_1 = 0$	340.23	1 007	1 755.47
	$\omega_2 = 0$			
a	$\omega_1 = 1$	280.69	641.63	1 754.97
	$\omega_2 = 0$			
b	$\omega_1 = 0.5$	287.58	875.68	1 745.12
	$\omega_2 = 0.5$			
c	$\omega_1 = 0$	297.66	1 007	1 743.67
	$\omega_2 = 1$			

图4为目标函数中取不同权重时,储能系统充

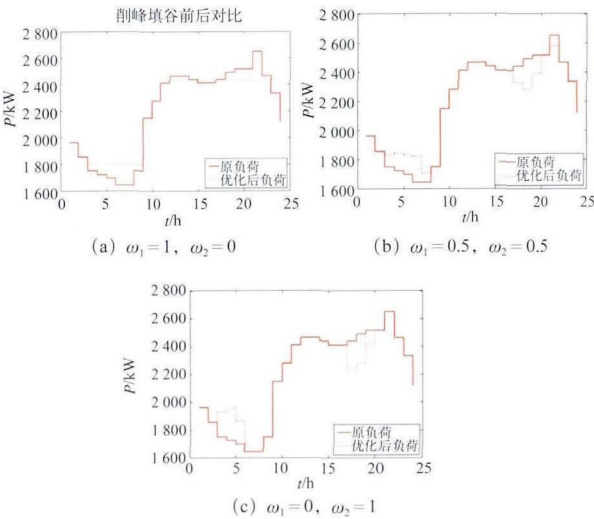


图4 储能系统充放电前后负荷曲线对比

放电前后的对比。图4与表6相配合可以看到,方案a的削峰填谷效果最为明显,负荷曲线在峰谷时段也最为平稳,但电费最高,与未进行削峰填谷时并没有明显下降;方案b起到了一定的削峰填谷效果,同时也降低了电费,但负荷曲线并不够平滑;方案c单纯考虑电费因素,虽然电费最低,没有达到削峰填谷效果,峰谷值并无变化,只是电费方面得到了降低。

进一步模拟随着目标函数中负荷标准差权重增加削峰填谷效果及电费支出变化,权重增加步长为0.02。图5为不同权重下削峰填谷效果及电费支出的对比,图中用 w 表示目标函数中负荷标准差权重,相应的电费权重即为 $1 - w$ 。结合上述方案a、b和c的分析可知,对于本文所提出的模型中,存在一个削峰填谷和经济性之间的拐点。达到该拐点时,削峰填谷效果更为明显,而相应的电费支出则大幅上升。在实际运用中,可根据日前计算的结果寻找出相应的拐点,按照相应的要求进行电池储能系统充放电调度,以达到所需要的目标。在本算例中,拐点为负荷标准差权重等于0.4。

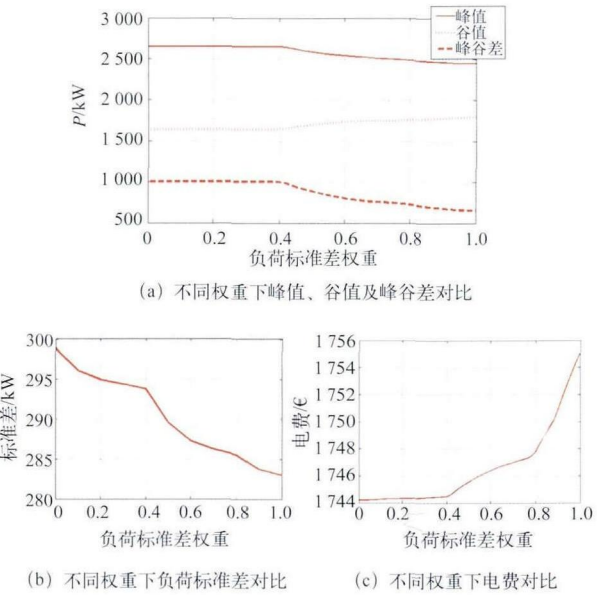


图5 不同权重下削峰填谷效果及电费支出对比

结束语

本文从可靠性要求出发设置电池储能系统的功率与容量参数,综合考虑削峰填谷与电费支出

的要求,建立了储能充放电优化模型,采用内点法求解该模型,具体进行了以下研究:

1) 本文提出了基于随机生产模拟,分别根据需要LOLP和EENS确定储能系统功率和容量的计算方法,以满足供电可靠性。

2) 基于确定的储能系统功率,本文采用负荷标准差及电费作为削峰填谷评定指标,按照不同比重设定目标确定各个时段的充放电功率。

3) 仿真算例表明,两类指标LOLP和EENS确定的储能系统相关参数有所不同;目标函数中,削峰填谷效果与电费支付的之间变化存在相应的权重拐点,应根据实际需要去确定两者的权重。

4) 该模型可用于日前根据削峰填谷与经济性要求进行储能系统充放电的调度。

本文在采用分时电价方面缺少更加细化的分时电价,如以5 min为一个节点的分时电价,可作为进一步研究的内容。

参考文献

- [1] 黄蕾,李丰伟,秦俊宁.基于效益分析的抽水蓄能电站运行工况优化调度[J].电力系统保护与控制,2009,37(22):94-98.
- [2] 汪卫华,张慧敏,陈方.用削峰填谷方法提高供电企业效益的分析[J].电网技术,2004,28(18):79-81.
- [3] 胡福年,汤玉东,邹云.峰谷分时电价理论建模与应用研究[J].电气应用,2007,26(4):39-45,49.
- [4] 胡福年,汤玉东,邹云.需求侧实行峰谷分时电价策略的影响分析[J].电工技术学报,2007,22(4):168-174.
- [5] Li X, Yamashiro S, Wu L, Liu Z, Ouyang M. Generation scheduling in deregulated power market taking into account transmission loss allocation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(7):883-892.
- [6] 童灵华.抽水蓄能电站效益分析与运行优化[D].杭州:浙江大学,2010.
- [7] 骆妮,李建林.储能技术在电力系统中的研究进展[J].电网与清洁能源,2012,28(2):71-79.
- [8] 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.
- [9] 夏清,王少军,相年德.时序负荷曲线下电力系统概率性生产模拟[J].中国电机工程学报,1994,14(3):21-28.
- [10] 王锡凡.电力系统优化规划[M].北京:水利水电出版社,1990:125-182.
- [11] Sigrist L, Lobato E, Rouco L. Energy storage systems providing primary reserve and peak shaving in small isolated power systems: an economic assessment[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2013, 53(4):675-683.
- [12] Sun Y, Wang S, Xiao F, Gao D. Peak load shifting control using different cold thermal energy storage facilities in commercial buildings: a review[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 71(5):101-114.
- [13] Oudalov A, Cherkaoui R, Beguin A. Sizing and optimal operation of battery energy storage system for peak shaving application[C]. Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, IEEE, 2007:621-625.
- [14] Grigg C, Wong P, Albrecht P, et al. The IEEE reliability test system-1996. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3):1010-1020.
- [15] Hu W, Chen Z, Bak-Jensen B. Optimal operation strategy of battery energy storage system to real-time electricity price in Denmark[C]. Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, IEEE, 2010:1-7.
- [16] 赵国波,刘天琪,李兴源.分布式发电作为备用电源的优化配置[J].电力系统自动化,2009,33(1):85-89.

(收稿日期:2014-11-05) **EA**