

储能系统应用于用户侧的技术经济分析

分析了储能系统在用户侧的应用模式，定量计算了用户侧储能不同安装地点对用户供电可靠性指标的影响。分析了储能系统应用于用户侧带来的经济效益。通过算例，比较了不同的储能充放电方案为用户节省的费用，从而得出具备可行性的用户侧储能系统实施方案。

邢洁 曹哲 张怡/上海电力设计院有限公司

孙强/上海市南集团公司松江分公司



邢洁/高级工程师

0 引言

近些年，随着电池储能技术的发展，储能系统逐步扩大了在电力系统各个领域的应用，主要用于配合平抑太阳能、风能等新能源发电的出力波动^[1]、提高电能质量、削峰填谷、提高孤立电网稳定性以及作为应急备用电源提高供电可靠性等^[2]。

当前，用户对电力供应的关注点主要集中在两个方面：一方面是电能供应的可靠性；另一方面是日益扩大的峰谷差价带来的附加效益。近五年，随着电池储能技术研究的不断深入，其单位容量造价降低很快。储能电池具有占地面积小、低噪声和无排放污染等优势，可以作为不间断电源为用户提供高质量的电能，成为提高用户供电可靠性的解决方案^[3]，而且储能系统应用于用户侧实现负荷侧削峰填谷、获得额外收益也具备了实施的可行性。

基于此背景，本文分析了储能系统在用户侧的应用模式，定量计算了用户侧储能不同安装地点对用户供电可靠

性指标的影响，研究了储能系统对不同等级重要用户的可靠性改善效果。分析了储能系统应用于用户侧带来的经济效益，通过算例比较了不同的储能充放电策略为用户节省的费用，从而得出具备可行性的用户侧储能系统实施方案。

1 重要用户的供电模式及可靠性

随着经济的发展，用户对电能供应的连续性和可靠性的要求更加严格，一些重要用户的用电设备要求不间断供电。根据供电可靠性的要求以及中断供电危害程度，重要电力用户分为特级、一级、二级重要电力用户和临时性重要电力用户^[4]。重要电力用户供电电源配置至少应符合以下要求：特级重要用户具备三路电源供电条件，其中的两路电源应当来自两个不同的变电站；一级重要用户具备两路电源供电条件，两路电源应当来自两个不同的变电站；二级重要用户具备双回路供电条件，供电电源可以来自同一个变电站的不同母线段。

重要用户采用的供电可靠性的评价指标主要有：用户平均故障率（次/年）、用户平均停电持续时间（h/年）和用户平均年停电时间（h/年）。

影响重要用户供电可靠性的原因除去自然灾害、设备故障率和运行管理水平等要素外，改善电网结构是提升用户供电可靠性的有效措施。目前，配电网用户侧普遍采用放射状接线形式，电源个数成为影响用户供电可靠性的关键因素。

根据2013年的统计数据，全国范围内经各级地方政府有关部门认定的重要

关键词/Keywords

用户侧·
储能系统·
供电可靠性·
经济效益·

国家高技术研究发展计划（863计划）
(2014AA052202)。

用户共有38 000余家。其中，特级、一级和二级重要用户分别占全部重要用户的0.4%、31.0%和68.6%^[5-6]。不同等级重要用户供电电源配置情况如表1所示。

表1 重要用户供电电源配置情况

重要用户等级	三路及以上	双路供电电源		单路供电
	供电电源	不同变电站	同一变电站	电源
特级 (%)	49.0	51.0 39.2	11.8	0
一级 (%)	3.0	58.4 43.6	14.8	38.5
二级 (%)	3.0	51.9 31.2	20.7	46.3

由表1可知，各级重要用户中都有相当一部分采用了单电源供电模式，其中二级重要用户的单电源配置率甚至高达46.3%；一级及以上的重要用户主要采用双路供电电源，但是单路供电电源的比例也占到了38.5%。单电源供电模式可靠性较低，此供电模式将给重要用户的正常供电埋下较大的安全隐患。

图1为重要用户的三种供电模式。模式一为单电源供电；模式二为双回路供电，两路电源来自同一个变电站；模式三为双电源供电，两路电源来自不同的变电站。其中， $T_1 \sim T_4$ 为变压器， $B_1 \sim B_5$ 为开关设备， $L_1 \sim L_2$ 为线路。为了突出研究对象，各种供电模式皆采用全专线供电；线路类型皆为架空线，不考虑线路的容量约束，即任何一路电源都能带满全部负荷。

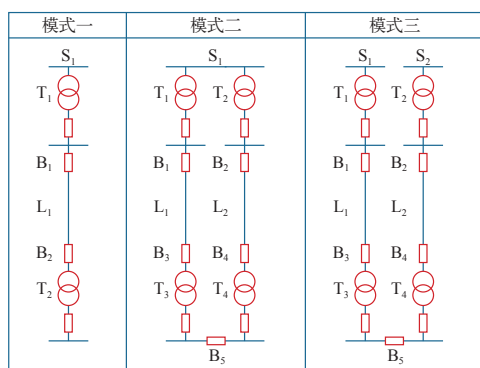


图1 重要用户常用供电模式

采用PSSE软件SRA模块计算各供电模式下重要用户的供电可靠性。计算模型的输入参数如表2

所示。其中， λ_p 为故障率，次/年；MTTR为平均修复时间，h。

表2 各电力元件的可靠性参数

设备	λ_p (次/年·次/年·km)	MTTR/h
母线	0.003	25
高/低压变压器	0.05/0.03	60/2
断路器	0.019 20	40
隔离开关	0.002 86	8
线路	0.004 5	6
上级变电站母线	0.001	10

以上三种供电模式的可靠性仿真结果如表3所示。

表3 三种模式供电可靠性计算结果

供电方式	故障后指标		倒闸后指标		供电可靠性 (%)
	故障频率 / (次/年)	故障概率 / (h/年)	故障频率 / (次/年)	故障概率 / (h/年)	
单回路	0.271	0.27	0.271	8.71	99.897 5
双回路	0.583 3	0.58	0.075 3	2.05	99.970 0
双电源	0.575 6	0.58	0.011 7	0.2	99.991 1

2 储能系统应急备用电源

增加应急备用电源个数可以提高用户的供电可靠性。不同应急备用电源方案的选用需要结合应急负荷的容量以及允许间断供电时间等技术特性来考虑。常用的应急备用电源有独立于正常电源的发电机组、储能系统等。

储能系统用作不间断电源（UPS）时，其在市电异常情况下的切换时间为毫秒级，可以用于计算机数据处理系统、精密电子仪器等不能中断供电的场所。但是由于UPS电源需要不间断工作，因此对于温度等外在环境条件要求高，使用寿命不长。储能系统用于允许短时电源中断的应急电源（EPS）时，在市电异常情况下的切换时间为0.1~0.25 s，可就地设置，适应类似地下室等较恶劣的工作环境。

柴油发电机组作为应急备用电源通过内燃机驱动发电机来供电。在燃料储备充足的情况下，可连续供电的时间长，然而存在较多的安全环保问题，例如发电机噪声大，柴油燃烧产生SO₂污染，储油罐存在火灾隐患等。因此机组存在的冷却、排烟、减震和消音等问题需要在应用时予以

解决。表4为常用应急电源的技术性能比较。

从投切时间和常规容量来看，储能系统的切换时间最短，但是造价高，因此通常小规模使用，用以满足数据中心或生产线等对电能质量要

求高、需要不间断供电的部分负荷的短时供电需求。柴油发电机起动时间较长，发电量与柴油备用量密切相关，在柴油储备足够的情况下，可以保证用户在离网状态下较长时间运行。

表4 常用应急电源的技术性能比较

电源种类	常规容量	工作方式	持续供电时间	切换方式	切换时间
储能电池	千瓦级、兆瓦级	热、冷备用	10~30 min/60 min/	在线或静态转换开关（STS），	<10 ms(STS)
			90 min/120 min/12 h	自动转换开关（ATS）	<2 ms(ATS)
柴油发电机	2.5 kW~2.5 MW	热、冷备用	12 h	自动转换开关（ATS）或手动	5~30 s

3 储能系统对重要用户供电可靠性的影响

储能系统的安装地点比较灵活，可以选择装设在用户进线变电站的低压侧或用户站的高（低）压侧。给出对应图1常见的三种供电模式下储能系统不同安装地点的示意图，如图2所示。

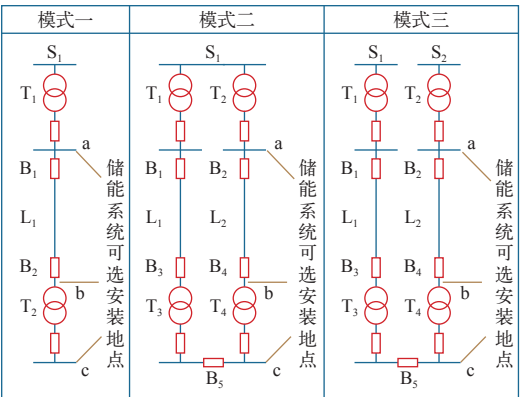


图2 重要用户常用供电模式下的储能安装方案

采用PSS软件计算各供电模式下重要用户的供电可靠性。各电力元件的可靠性参数同表2。以上三种供电模式的可靠性仿真结果如表5所示。

通过分析表5，可以得出以下结论。储能系统的配置对单回路、双回路供电模式的可靠性有较大提升，尤其是对于单回路供电模式。储能系统配置对双电源供电模式的可靠率几乎无提升效果。主要原因是双电源供电模式已满足N-1安全准则，储能系统仅能在N-1-1或N-2的条件下发挥作用，而发生这种类型故障的概率非常小，从而导致其对双电源供电模式可靠率无明显提升效果。

在储能系统与上级电源的可靠性指标一致的情况下，储能系统安装位置越靠近用户侧，对用

表5 三种模式加装储能的供电可靠性计算结果

供电方式	安装地点	故障后指标		倒闸后指标		供电可靠率(%)
		故障频率/(次/年)	故障概率/(h/年)	故障频率/(次/年)	故障概率/(h/年)	
单回路	a	0.271	0.27	0.271	8.71	99.897 5
	b	0.271	0.27	0.139 1	3.06	99.962 0
	c	0.193 1	0.19	0.033 8	0.99	99.986 5
双回路	a	0.583 3	0.58	0.075 3	2.05	99.970 0
	b	0.583 3	0.58	0.068 6	1.99	99.970 7
	c	0.558 4	0.56	0.067 6	1.97	99.971 1
双电源	a	0.575 6	0.58	0.011 7	0.2	99.991 1
	b	0.575 6	0.58	0.011 7	0.2	99.991 1
	c	0.575 6	0.58	0.011 7	0.2	99.991 1

户的供电可靠率提升越明显。需要说明的是，当储能系统安装于c点时，单回路供电模式可靠性超过双回路供电可靠性。主要原因是单回路供电模式所包含的电力元件较双回路供电模式少，而储能系统的配置使用户等效为双电源供电模式，从而导致在该条件下单回路供电模式可靠率超过双回路供电模式。

综合来看，储能系统作为应急备用电源，不改变用户的主接线形式，安装方式较为灵活。

4 用户侧储能系统的经济效益

4.1 用户侧储能系统的经济效益

储能系统应用于用户侧的经济效益主要体现在以下几方面。

(1) 减少用户停电损失

在用户侧加装储能系统，可以提高用户的供电可靠性，减少停电损失。用户的停电损失费用不能仅仅以支付的电费来估算，而主要由机会收

益（即偶发性停电故障所造成的损失）来评判。而且除生产损失这一直接损失外，停电还会造成重大的社会影响，这一间接损失很难用经济性指标来评估^[6]。用户停电损失风险的降低可以通过用户供电可靠性指标的提高来间接表征。

（2）减少用户配电变压器容量的投资成本

大多用户的负荷曲线都存在峰谷差，而用户配电变压器容量要根据最大负荷需求来选取，这往往受季节性高峰负荷的影响。若在城市用户配电站低压侧安装储能系统，通过控制储能系统的充放电策略，可以实现在用户负荷低谷时充电，储存电能，在城市负荷高峰时放电，满足用户电能需求。这样可以降低变压器设备容量，通过变压器合理选型，节省设备一次投资费用。

（3）低储高发获利

根据电力公司用户分时电价表，工商业用户一般需要按照两部制电价交纳用电费用，电费包含两部分：一部分为基本电费，根据用户变压器容量或每月最大用电需求量来计算；另一部分为电度电费，根据不同用电时段的用户实际用电量来计算。

安装储能系统可以削峰填谷，降低用户电网侧的负荷高峰，相应减少用户每月所需交纳的基本电费；同时，由于电度电价在峰、谷、平三个时段是不同的，用户安装储能系统，通过在谷价时段自电网充电，峰价时段放电自用，可以降低电度电费。

（4）降低配电变压器损耗的费用

用户在用电过程中，配电变压器随负载的增大会产生更多损耗。用户侧安装储能系统后在其负荷低谷时段充电，提高了变压器的负载率，从而增加了损耗；在其负荷高峰时段放电，降低了变压器的负载率，从而减少了损耗。由于变压器的损耗所产生的费用是计入用户电费的，所以当用户的用电负荷曲线与电网的峰谷平定价曲线相对一致时，通过储能系统对用户负荷进行削峰填谷，用户变压器损耗所产生的电费也会降低。

在现在的用户用电中，由于考虑到储能系统的维修和维护，往往还是根据不加装储能时的负荷需求来确定配电变压器容量。因此，储能系统的

直接经济效益主要体现在节省电度电费和基本电费。

4.2 用户侧储能系统的经济性评价指标

用于分析用户侧加装储能系统以后的经济效益，可以采用费用年值法或者差额内部收益率法。费用年值法是指把投资等值折算为年值后再与年运行费相加，取和最小者为最经济方案。差额内部收益率是指两个方案各年净现金流量差额的现值之和等于零时的折现率，或者说两方案净现值（或净年值）相等时的折现率。

5 算例

某用户的典型日负荷曲线如图3所示。其中高峰负荷约为2.52 MW，低谷负荷约为0.50 MW，用户的年用电量为8 099.78 MW·h。

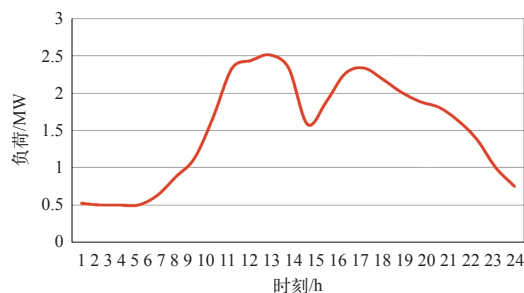


图3 用户典型日负荷曲线

《上海市非居民用户电价表（分时）》规定：两部制非夏季的峰时段为8~11时、18~21时，平时段为6~8时、11~18时和21~22时，谷时段为22时~次日6时；两部制夏季的峰时段为8~11时、13~15时和18~21时，平时段为6~8时、11~13时、15~18时和21~22时，谷时段为22时~次日6时。根据电度电价和基本电费（42元/kW·月），用户一年需缴纳的电费约为945.38万元。

若在城市用户侧配置0.9 MW·h的储能，按3 000元/kW·h的投资成本，初期一次性投资270万元。以非夏季的日充放电为例，制定储能的充放电策略，策略1和策略2的充放电对比波形如图4所示。由图4可见，策略1在1~4时，储能系统充电0.9 MW·h，在8~11时，储能系统放电0.9 MW·h；策略2在1~4时、12~14时和17~18时，储能系统充电，在8~11时和18~21时，储能系统放电。

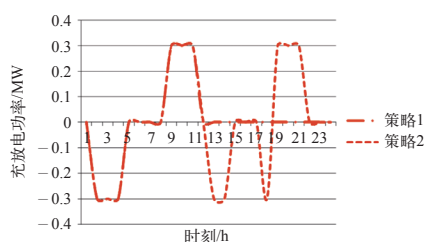


图4 不同策略下的储能电池日充放电曲线

对应两种储能充放电策略的用户日负荷变化曲线如图5所示。

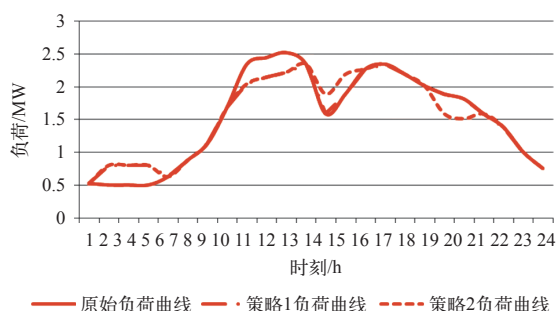


图5 储能不同充放电策略下的用户日负荷曲线

用户对应两种运行策略的年用电量并没有受到限制,但由于利用了电价峰谷差,所以年缴纳的电费分别降低为911.56万元、903.11万元,节省的电费包括电度电费 and 基本电费。

下面分别利用费用年值法和差额内部收益率法比较两个策略的经济性。

两种运行策略的基本收益率取7%,电池的充放电次数为3 000次,策略1的运营期为13.6年,策略2的使用次数多,使用年限折减为6.8年。经计算,策略1的费用年值 NA_1 为941.96万元,策略2的费用年值 NA_2 为951.93万元。与用户不配置储能原始情况下费用年值 NA (945.38万元)相比, $NA_1 < NA < NA_2$,策略1的费用年值低,为较优方案。

策略1相对用户初始情况下的差额内部收益率为8.814%,大于基准内部收益率7%;策略2相对用户初始情况下的差额内部收益率为3.127%,小于基准内部收益率7%。差额内部收益率法的比较结果同样说明策略1具备回收投资的经济性。

综合分析,在储能初期投资相等的前提下,两个策略都是通过利用峰谷电价差以期获得收益。由于储能电池的寿命主要取决于其充放电次

数,因此尽管策略2每天的充放电次数大于策略1,年缴纳的电费更低,但由于使用次数的降低而造成使用年限折减,不具备回收投资的经济性。策略1虽然可以回收投资,但是由于目前储能电池单位造价还较高,因此经济性并不显著。随着储能技术的发展,单位成本的降低,储能系统在用用户侧的应用前景仍然值得期待。

6 结束语

1) 储能系统的配置对重要用户单回路、双回路供电模式的可靠性有较大提升。储能系统配置对双电源供电模式的重要用户的可靠性无明显提升效果,主要原因是双电源供电模式已满足 $N-1$ 安全准则,发生两重及以上故障的概率非常小。

2) 针对目前的储能系统单位造价水平和两部制电价的收费标准,在用户侧配置储能系统,利用峰谷电价差制定储能充放电策略可以节省用户侧应缴纳的电费,具备一定的经济性。随着储能技术的发展以及单位成本的降低,储能系统在用用户侧的应用前景值得期待。

参考文献

- [1] 王成山,于波,肖峻,等.平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J].中国电机工程学报,2012,32(16):1-7.
- [2] 电池储能电站发展扶持政策研究课题组.国外电池储能电站发展及其政策扶持[J].上海节能,2013(5):27-29.
- [3] 王承民,孙伟卿,衣涛,等.智能电网中储能技术应用规划及其效益评估方法综述[J].中国电机工程学报,2013,33(7):33-41.
- [4] GB/Z 29328—2012 重要电力用户供电电源及自备应急电源配置技术规范[S].
- [5] 徐浩,陈健,马帅,等.不同电源数对重要用户供电可靠性的影响研究[J].供用电,2014(6):30-35.
- [6] 陈振宇,苏跃进.改善用户供电可靠性的技术经济分析[J].电力需求侧管理,2002,4(3):8-10.

(收稿日期:2016-02-15) **EA**