

统一电能质量调节装置储能系统最优化设计

张华赢¹, 朱正国¹, 胡子珩¹, 姚森敬¹, 黄志伟¹, 史帅彬¹

韩蓄², 邓珂琳², 曹军威²

1. 深圳供电局有限公司, 深圳 518000

2. 清华大学信息技术研究院, 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084

基金资助项目: 国家 973 基础研究计划(2013CB228206); 国家自然科学基金(61233016); 中国南方电网公司科技项目 (K-SZ2012-026) 项目。

摘要

研究目的: 在统一电能质量调节装置储能系统研发过程中, 有效地匹配超级电容与蓄电池的组合方式及充放电控制策略, 建立一种既能满足大容量长时间的补偿需求, 又能够应对高频率及高跌落深度的电压暂降事件, 同时将成本压缩到最低, 对环境污染也尽可能最小的储能系统设计优化模型。

研究方法: 以特定的电压暂降数据为依据, 综合储能系统的蓄能元件超级电容和蓄电池的容量、补偿时间、耐压等级、使用寿命和稳定性等各项设计及评价指标, 利用数值分析的形式, 计算出各指标内部及外部独立的相互关系, 建立一套衡量储能系统优化标准的评价体系, 并结合充放电策略定义全局的储能系统模型。

研究结果: 通过对储能系统的各项评价指标及充放电策略进行数值分析, 建立的优化模型包含了储能系统的整套评价及优化流程, 并利用标幺的方式定义了储能系统的优化程度。

结论: 利用此优化模型设计的储能系统在统一电能质量调节装置的仿真中进行电压补偿仿真, 完全符合高频率及高跌落深度的补偿要求, 并且利用模型的优化算法有效地控制了储能系统的整体使用寿命及成本等比较关键的性能指标, 对统一电能质量调节装置的研制有着指导借鉴作用。

关键词

统一电能质量调节; 电压暂降; 无功补偿; 储能系统; 超级电容; 蓄电池;

Optimal Design of Energy Storage for Unified Power Quality Conditioners

ZHANG Huaying¹, Zhu Zhengguo¹, HU Ziheng¹, YAO Senjing¹, HUANG Zhiwei¹, SHI Shuaibin¹

HANXu², DENG Kelin², CAO Junwei²

1. Shenzhen Power Supply Co. Ltd., Shenzhen 518000, China

2. Research Institute of Information Technology, Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

This work was supported by grants from the National 973 Basic Research Program (2013CB228206), National Natural Science Foundation of China (61233016) and China Southern Power Grid (K-SZ2012-026).

Corresponding author: CAO Junwei

Tel:+86(10)62772260

E-mail: jcao@tsinghua.edu.cn

Abstract

Objective: This work aims to develop an optimal model of energy storage for a unified power quality conditioner (UPQC) that not only has a large compensation capacity, but also can deal with the high frequency and deep voltage sags without a significant cost, by effectively assembling EDLC and batteries with a new charging control algorithm.

Methods: All the attributes and external relations of performance criteria of energy storage are identified by using a large amount of data on voltage sags. The criteria are most relevant in six key evaluation parameters: capacity, compensation time, pressure rating, life cycle and stability. In this work, a numerical analysis method is proposed to establish a comprehensive optimization system and a new control algorithm is developed for simulation of energy storage performance.

Results: Optimal levels of energy storage are defined by per-unit values, and the performance based on compensating voltage sags is also verified via simulation experiments.

Conclusion: It has been demonstrated that high frequency and deep voltage sags are effectively compensated, and attributes of this optimization model such as life cycles and costs of the whole system are also controlled. The optimization design has proven to be a viable, promising and instructional method for developing energy storage in UPQC.

Keyword

Unified Power Quality Conditioner; Voltage Sag; Reactive Power Compensation; Energy Storage; EDLC; Battery

0 引言

随着信息化社会的发展，电力电子仪器、计算机等设备在众多领域内取得了广泛的应用，尤其是在工厂生产线，精密加工等制造现场，由落雷，风雪引起的停电、电压跌落会使其造成巨大的经济损失，因此高品质的电能质量成为了近年来企业生产的重要指标，而作为保证电能质量的有效措施，电能质量治理装置中的储能单元利用铅蓄电池作为不间断电源（UPS）的方法仍然处于主流地位。

另一方面，近年来随着全球范围内环境污染问题的深刻加剧，环境保护的概念也逐渐受到社会越来越高的关注，尤其是我国这样环境污染较为严峻的国家则更为突出。在我国南方沿海地带，经济发展较快，如深圳地处珠江三角，毗邻香港特区，作为全国第四个负荷过千万的城市，全市的用电量甚至可与一个普通省份用电量相比较，在这 2020 平方公里的土地上承载了 1315 万千瓦的负荷，而这其中大部分为各类微电子、半导体、生物医药、精密制造等高新技术类企业，以及医院、金融业、通信行业、大型数据中心等敏感类用电企业，因此近年来对电网的供电电能质量提出了更高的要求。

如何满足这类高端用户对于高品质供电的应用需求，已成为深圳电网亟待解决的难题。在这种情况下，统一电能质量调节装置作为电能质量治理的有效设备之一，成为了深圳电能质量综合治理工作的重点，而作

为统一电能质量调节装置的核心部件——储能系统，如果能够将具有大容量的超级电容器作为蓄电池等能源设备的替代储能，就能为电压暂降和短时间停电提供更加优化的解决方案。在以往的设计研发中，虽然超级电容自身的物理属性决定了它的充放电速度要远远的高于蓄电池，即使组合了超级电容与蓄电池，从整体的使用寿命考虑，也会采取单独控制超级电容与蓄电池的充放电策略，避免高频的电压暂降补偿使蓄电池同超级电容一起不断的充放电。因此，单纯通过比较单用超级电容或蓄电池，以及超级电容与蓄电池组合储能三种方案的充放电效率进而决定最优方案的实际意义并不是很大。同时，部分储能系统采用蓄电池的目的在于成本低廉地提高耐压等级和补偿容量，并可避免串联大量超级电容所造成的成本标高。因此，在深圳电能质量综合治理中，通过利用统一电能质量调节装置，如何有效的组合超级电容与蓄电池，建立一种既能满足大容量长时间的补偿需求，又能够应对深圳近年高频率的电压暂降事件，同时又能将开发及治理成本压缩到最低，对环境污染也尽可能最小的统一电能质量调节装置储能单元优化模型变得很有必要。

1 储能系统性能

1.1 超级电容与蓄电池的性能比较

超级电容的使用寿命长，同蓄电池相比较，理论上的使用寿命可达 10 万回以上，而普通的铅酸蓄电池，镍镉电池，锂离子电

池等只有 300~800 回左右的使用寿命；无需维护，相对铅蓄电池平均 5~8 年就要更换一次的维护特点，超级电容器的充放电过程不含化学反应，基本不存在特性劣化的问题，所以一般 15 年内不需要维护；环保，不含铅、镉等重金属，对环境的污染性较小，废弃时不需要回收处理。使用温度范围广，低温下（-10℃）不容易劣化，使用温度范围可达-25℃~85℃，同比之下蓄电池的抗低温能力较弱；充放电效率高，由于内部电阻非常小，发热非常少，相比铅蓄电池可大电流放电，尤其是短时间内的充放电非常有利。一般充放电时间数秒，而蓄电池则需要数小时才能充满；无记忆效应，不存在因电池放电深度不同，充放电不完全而导致蓄电池暂时性的容量减小和使用时间缩短等问题。

超级电容器与现阶段一些比较主流的蓄电池性能比较参数详见下表^[4]：

表 1 超级电容器与蓄电池的性能比较

Table 1 Performance of EDLC and storage battery

种类 项目	双电层 电容	铅酸 蓄电池	镍镉 蓄电池	锂离子 电池
工作电压	0~3V	2.0V	1.2V	3.6V
使用寿命	10 万回 以上	500 ~800 回	300 回 以上	300 ~1000 回
温度范围	-25 ~85℃	0 ~50℃	0 ~45℃	-20 ~50℃
能量密度	1~3 Wh/kg	75 Wh/kg	90 Wh/kg	300 Wh/kg
功率密度	5000 W/kg	40 Wh/kg	80 Wh/kg	120 Wh/kg
充电时间	数秒	数小时	数小时	数小时
公害性	少	含铅	含镉	少
成本	高	低	中	高
耐放电			强	弱

由表 1 可见，超级电容具有极高的使用寿命、功率密度以及非常短的充电时间，是极为理想的储能系统替代能源。然而，超级

电容的耐压等级极低，需要通过大量串联分压的形式提高整体的耐压性能，导致成本过高而经济性很差。同时，单一利用传统的铅酸电池，虽然价格低廉，但重金属的利用势必会造成不可避免的环境污染，且后期的维护成本较高，容易造成二次浪费。因此，通过组合超级电容和蓄电池，作为储能系统的蓄能单元成为了最为理想的解决方案。

1.2 储能系统的评价指标

在组合超级电容和蓄电池的储能系统中，衡量储能系统的优化程度的指标有如下：
1，储能系统的总容量 P_e ，根据实际的电压暂降事件，通过充放电控制策略的最优化可决定超级电容和蓄电池的各自补偿容量；
2，整体的耐压等级 U_L ；
3，开发成本要求 G_{tc} ：选用不同厂商不同容量的超级电容和蓄电池，成本也会随之浮动，本论文中超级电容和蓄电池的成本取市场平均值作为参考。如果对超级电容的容量要求比较大，那么单体的价格会随之变高，同时耐电压等级不变，因此串联的个数不会发生变化，如为了扩大容量，可增加蓄电池的匹配数量；
4，储能系统的综合使用寿命 L_e ：以超级电容的理论使用寿命为基值，由充放电控制策略所延长的蓄电池使用寿命来判断；
5，储能系统的体积 S 和质量 W ；
6，稳定性，对后续开发高稳定性的系统设备起到借鉴性作用，其中稳定性指标涉猎的范围比较广^[5]。在储能系统方面，主要从厂商提供的产品质量来定义，本文中所涉及的稳定性指标为了避开模型

建造过程中过于复杂的不确定因素，均以预设的常数值 F 出现。

2 优化模型

储能系统的优化控制流程请参考图1，实际运算过程中，可由实际需要的预置补偿容量 P_e ，储能系统的成本控制参数 G_{tc} ，以及耐压等级 U_L 计算出单独使用超级电容作为储能单元时，超级电容实际的串并联个数 n_1' ， a_1' ；此时根据超级电容补偿方案中的电容器的具体规格，如单体静电容量 C_E 、价格 G_E

和额定电压 U_E 等参数，综合蓄电池的容量 P_S ，耐压等级 U_S 计算得到超级电容与蓄电池的混合系数 n_1, a_1, b_1 ；再由超级电容，蓄电池的单体尺寸 v_1, v_2 ，质量 m_1, m_2 ，计算得到装置的总体尺寸及重量评价指标 S 和 W ；同时，利用超级电容与蓄电池的使用寿命 L_1, L_2 ，计算得到储能系统的综合使用寿命 L_e ，并不断通过校正其中蓄电池每充放电一次与超

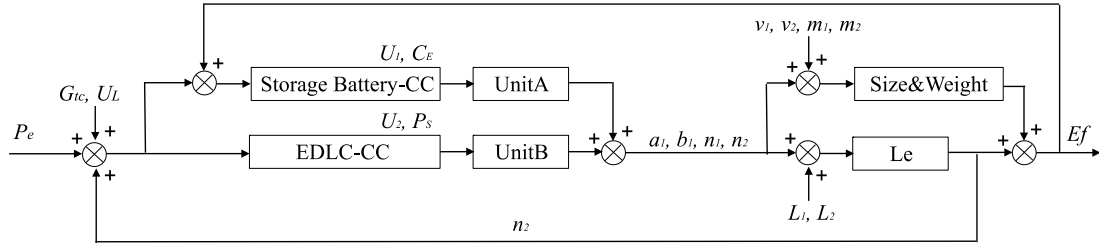


图 1 储能装置优化模型控制流程图
Fig. 1. Control scheme for energy storing unit modeling

级电容充放电次数总和的比值 n_2 ，形成负反馈，进而最终得到储能系统各评价指标矩阵 Θ 的优化解。

$$\Theta = \begin{pmatrix} P_e \\ U_L \\ G_{tc} \\ V \\ W \\ L_e \end{pmatrix}, \quad \xi = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \end{pmatrix}$$

- P_e : 储能系统预置补偿容量；
- U_L : 耐压等级；
- G_{tc} : 成本控制指标；
- V : 储能单元总体积；
- W : 储能单元总重量；
- L_e : 综合使用寿命；
- ξ : 各项指标的相关性矩阵。

这里 ξ 作为储能系统优化程度各项指标之间的相关程度，并不在本论文中深入讨论，各项指标的变量关系如下：

$$\begin{cases} n_1 a_1 G_E + b_1 G_S \leq G_{tc} & \text{①} \\ & \text{②} \\ & \text{③} \\ & \text{④} \\ & \text{⑤} \\ & \text{⑥} \end{cases}$$

代入矩阵 Θ 中，则有：

$$\Theta = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} P n_1 C_E (V_0^2 - V_1^2) - \frac{1}{2} b_1 P_S \\ a_1 U_E + b_1 U_S \\ n_1 a_1 G_E + b_1 G_S \\ n_1 v_1 + b_1 v_2 \\ n_1 a_1 m_1 + b_1 m_2 \\ n_2 L_e \end{pmatrix}$$

由此可解得储能系统的混合因子表达式，即矩阵 $R = (n_1 \ a_1 \ b_1)^T$ 的解为：

$$\begin{pmatrix} n_1 \\ a_1 \\ b_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{4P_e \cdot A + P_s \cdot (\sqrt{B^2 - 4AC})}{2C_E(V_0^2 - V_1^2) \cdot A} \\ \frac{2U_L \cdot A + U_s \cdot (\sqrt{B^2 - 4AC})}{2U_E \cdot A} \\ \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \end{pmatrix}$$

其中，系数矩阵 $S=(A \ B \ C)^T$ 为：

$$\begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_E U_S P_S \\ G_S U_E C_E (V_0^2 - V_1^2) - G_E (U_L P_S + 2U_S P_E) \\ 2G_E U_L P_E - G_{tc} U_E C_E (V_0^2 - V_1^2) \end{pmatrix}$$

以上储能系统的补偿容量均为理论值，实际线路中的负载功率因数 $\cos\phi$ ，超级电容及蓄电池放电效率 K 及逆变器的效率 η 均已忽略。将上述求得的评价指标矩阵 Θ ，利用雷达图对分别由 P_e ， U_L ， G_{tc} ， V ， L_e ， S ， W 等6个坐标轴围成的区域，根据两两坐标轴所代表

的变量之间的相关性，进行排列组合式的面积求解，并根据排列组合数的平均面积值，确定各变量的优化解，如图2所示。

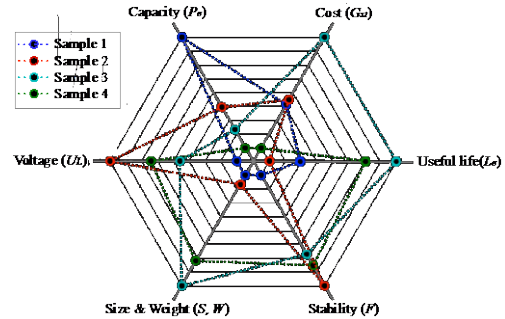


图2 基于Matlab的储能装置优化程度评价雷达图
Fig. 2. Radar chart for evaluating the performance of energy storing unit based on Matlab

3 仿真实验

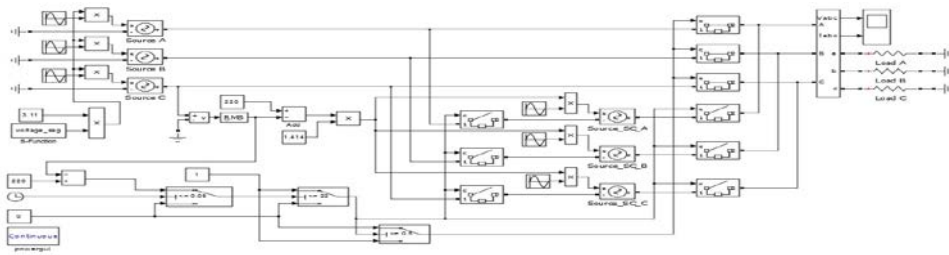


图3 基于Matlab的储能装置电压暂降实验
Fig. 3. Voltage sag experiment for energy storing unit based on Matlab

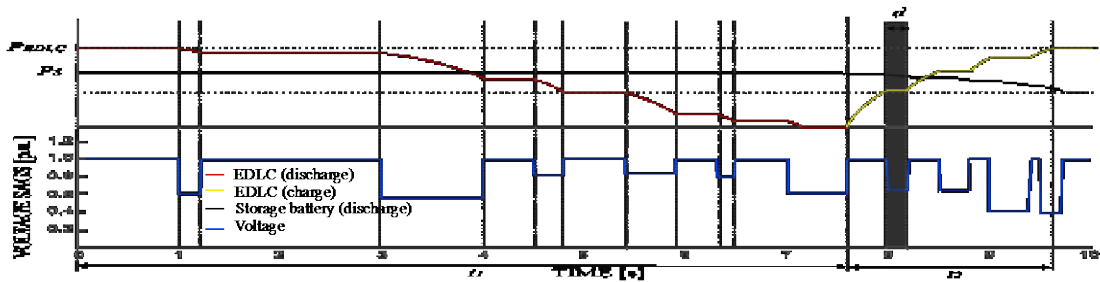


图4 基于Matlab的储能装置充放电及系统侧电压暂降图 (by GRAPHYER)
Fig. 4. Discharge & Charge chart of energy storing unit and system voltage sags chart based on Matlab

3.1 实验设计

为了验证补偿线路中，以深圳电能质量问题为依据，电压暂降发生时超级电容及蓄电池混合储能系统在控制策略层面提高蓄电池使用寿命的效果，本文使用MATLAB/Simulink 模拟混合储能系统对电

压暂降的补偿过程(图3)，并利用上一节计算得到储能系统模型优化后的超级电容及蓄电池的组合参数，包含三相电压暂降发生模块、电压暂降检测模块、电压暂降补偿模块、混合储能模块和负载等仿真模块^{[6][7][8][9]}对深圳电能质量问题的最恶劣情况，如

10s 内发生的 10 次电压暂降(表 2)进行了补偿验证仿真实验。

表 2 电压暂降数据
Table 2 Data of voltage sags

	起始时间[s]	时长[s]	暂跌落幅值[p.u.]
1	1.0	0.2	0.393
2	3.0	1.0	0.447
3	4.5	0.3	0.186
4	5.4	0.5	0.164
5	6.3	0.2	0.207
6	7.0	0.6	0.383
7	8.0	0.2	0.347
8	8.5	0.3	0.363
9	9.0	0.4	0.595
10	9.5	0.2	0.611

图 4 绘制了相电压有效值曲线。电压暂降补偿分两个阶段,由储能系统优化模型计算得到的超级电容与蓄电池混合使用比 n_1 , a_1 , b_1 决定了超级电容储能单元的容量 P_{EDLC} 和蓄电池储能单元的容量 P_S , t_1 时间段内由超级电容补偿线路电压暂降,超级电容放电到额定电压 P_L 的 40% 后停止放电;在 t_2 时间段,由蓄电池补偿电压暂降,如图中灰色区域 d 所示:只有在线路电压处于稳态时允许超级电容充电;线路处于电压暂态不稳定时,超级电容自动停止充电。

3.2 实验结果

由仿真结果可以看出,利用储能优化模型组合的超级电容与蓄电池混合储能系统在控制策略合理的情况下,不仅可以良好地补偿线路电压暂降,而且超级电容的使用有效地减少了蓄电池的放电次数,延长了储能系统的整体使用寿命,其中蓄电池每充放电一次与超级电容充放电次数总和的比值 n_2 决定了储能系统的综合使用寿命 L_e 。

储能系统详细描述了各评价指标之间

的变量关系,并利用雷达图的二元平衡关系详细定义了储能系统的优化程度,但每个指标的相关性并没有在本文中详细讨论。这样在评价储能系统优化程度的同时,虽然能在某种程度决定储能单元的优化分配方式,但各指标的重要程度不同,也直接影响了储能系统最优化的定义范畴,因此实际的最优解需要定义各评价指标的六维关系。

4 结论

本文综合了统一电能质量调节装置储能系统的各项评价指标,并以深圳电能质量问题为依据,系统阐述了应对高频电压暂降时的储能系统优化计算模型,通过仿真模型进而决定了储能单元中超级电容及蓄电池的优化配比方案,并通过仿真实验验证了统一电能质量调节装置储能模型针对深圳电能质量问题的有效性,并对后续装置的研制起到指导借鉴作用。

参考文献

- [1] 金尾 則一,青木 孝典,「電気二重層コンデンサを用いた瞬低補償装置の開発」
- [2] 「プロフェッショナル講座」,トランジスタ技術,2004.6, P106~P107
- [3] 須藤 雅夫,渡辺 真志,「安価かつ充放電特性に優れた電気二重層キャパシタ」,新技術説明会,2009
- [4] 夏涛,袁志昌,《储能并网控制整体方案》,2013

- [5] 强国斌,李忠学,陈杰. 混合电动车用超级电容能量源建模[J]. 能源技术, 2005, 26(02): 58-61.
- [6] 邓隆阳,黄海燕,卢兰光,杨福源. 超级电容性能试验与建模研究[J]. 车用发动机, 2005, 186: 28-32.
- [7] 林成涛,王军平,陈全世. 动力汽车 SOC 估计方法原理与应用[J] 电池, 2004, 34(05): 376-378.
- [8] 林成涛,王军平,陈全世. 动力汽车 SOC 估计方法原理与应用[J] 电池, 2004, 34(05): 376-378.

作者简介：张华赢（1981-），男，硕士，工程师，从事高电压技术、电能质量综合治理技术研究。