

统一电能质量调节装置储能单元多目标综合优化

张华赢¹, 朱正国¹, 姚森敬¹, 刘鸿年², 韩 蓄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, 北京, 100084)

Comprehensive Multi-objective Optimization of Energy Storage Units for Unified Power Quality Conditioners

ZHANG Hua-ying¹, ZHU Zheng-guo¹, YAO Sen-jing¹, LIU Hong-nian², HAN Xu², CAO Jun-wei²

(1 Shenzhen Power Supply Co. Ltd, Shenzhen 518000, 2 Tsinghua University Research Institute of Information Technology, Beijing 100084)

ABSTRACT: With the great development of the Computer Science, information technology has made great changes in traditional industry fields. The application of high-tech equipment requires its electricity power supply to provide higher quality. Power quality has become the focus of attention of a growing number of enterprises. To keep a high level power quality, Unified Power Quality Conditioners (UPQC) with energy storage units are mainstreaming solutions. In this paper, a multi-objective optimization model considering the cost, device size and device weight is proposed. The mathematical relationship of the advantage using hybrid energy storage is deduced. The radar chart for comprehensive evaluation is improved. The work can be used to guide the design and development of the UPQC production.

KEY WORD: Voltage sag; UPQC; Energy storage; Multi-objective optimization;

摘要: 随着计算机科学技术的进步与发展, 信息技术越来越多和各个传统生产领域结合, 然而新的技术的投用, 设备的高精化, 使得设备对其动力的源泉——电能的品质有了更高的需求, 电能质量成为越来越多企业的关注的焦点, 在保障电能质量的方

面, 统一电能质量调节器(UPQC)等带有储能单元的治理装置的方法处于主流的地位。本文重点研究储能单元的多目标综合优化问题, 建立了综合成本, 质量, 体积三者的综合最优模型, 给出了混合储能给蓄电池寿命带来的延长效应的量化公式, 最后对综合评价的雷达图进行了改进。对后继产品的开发设计给出了综合优化指导建议。

关键词: 电压暂降; 统一电能质量调节器; 储能; 多目标优化

1 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。

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的焦点，而作为统一电能质量调节装置的核心部件——储能装置，如果能够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装置，就能为电压暂降和短时间停电提供更加优化的解决方案。

在我们的前期工作[1]中，我们已经对统一电能质量调节装置储能系统的最优化设计模型给出了设计与说明，储能和超级电容建模方面的工作参考[2-9]。本文着重在此基础上多目标综合优化，引入更多的数学工具进行深入的剖析和调优。

2 多目标优化

2.1 模型定义

首先我们定义了如下指标，参见下表：

表 1 模型定义

指标含义	标识
超级电容的容量	P_E
超级电容的体积	V_E
超级电容的质量	M_E
蓄电池的体积	V_S
蓄电池的质量	M_S
储能装置体积	V
储能装置质量	M
超级电容寿命	L_E
蓄电池寿命	L_S
体积指标	V_{tc}

质量指标	M_{tc}
------	----------

将上述方程组给予梳理为：

$$\begin{cases} \frac{1}{2}n_1P_E + \frac{1}{2}b_1P_S = P_g \\ a_1U_E + b_1U_S = U_L \\ n_1a_1G_E + b_1G_S = G \leq G_{tc} \\ n_1a_1V_E + b_1V_S = V \leq V_{tc} \\ n_1a_1M_E + b_1M_S = M \leq M_{tc} \\ n_2L_S = L_g \leq L_E \end{cases}$$

2.2 综合优化

模型中以成本，体积和质量的综合最优为目标函数，并将额定补偿容量与额定电压等级为约束方程，将最优化问题的求解朴素地变为下述问题：

$$\inf\{\alpha G + \beta V + \gamma M\} \dots\dots (\alpha + \beta + \gamma = 1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \frac{1}{2}n_1P_E + \frac{1}{2}b_1P_S = P_g \\ a_1U_E + b_1U_S = U_L \end{cases}$$

其中 α, β, γ 为最优化指标加权系数，反应了生产者对成本，体积，质量的关注程度，通常越重视的指标系数就越大，但三项指标的系数和恒为 1。但上述方程的最优化方程存在的一个问题那即是成本、体积和质量的量纲不统一，直接乘以系数求和无意义。于是利用体积指标，质量指标和成本指标对上述三项进行去量纲化，同时将约束条件进行同样的变换处理将最优求解问题变换为：

$$\begin{aligned} &\inf\left\{\alpha \frac{G}{G_{tc}} + \beta \frac{V}{V_{tc}} + \gamma \frac{M}{M_{tc}}\right\} \\ &\text{s.t.} \begin{cases} \frac{P_E}{2P_g}n_1 + \frac{P_S}{2P_g}b_1 - 1 = 0 \\ \frac{U_E}{U_L}a_1 + \frac{U_S}{U_L}b_1 - 1 = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

将 G, V, M 的数值代入并整理合并系数可以得到最终将问题转化为如下最优化

问题的求解:

$$\begin{aligned} & \inf\{f_E n_1 a_1 + f_S b_1\} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \frac{P_E}{2P_E} n_1 + \frac{P_S}{2P_E} b_1 - 1 = 0 \\ \frac{U_E}{U_L} a_1 + \frac{U_S}{U_L} b_1 - 1 = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ n_1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \frac{U_L}{U_E} & -\frac{2U_S P_E}{U_E P_S} & \frac{P_E}{P_S} \\ \frac{U_L}{U_S} & \frac{2P_E}{P_S} & -\frac{P_E U_E}{P_S U_S} \\ -\frac{U_L P_S}{U_S P_E} & \frac{2P_E}{P_E} & \frac{U_E}{U_S} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ f_E \end{pmatrix}$$

其中

$$f_E = \left(\alpha \frac{G_E}{G_{tc}} + \beta \frac{V_E}{V_{tc}} + \gamma \frac{M_E}{M_{tc}} \right)$$

$$f_S = \left(\alpha \frac{G_S}{G_{tc}} + \beta \frac{V_S}{V_{tc}} + \gamma \frac{M_S}{M_{tc}} \right)$$

由多元函数微积分求最值的理论, 引入 Lagrange 乘子将上述最优化问题化简为一个求下述无约束最值的问题:

$$\inf\{F(a_1, b_1, n_1, \lambda_1, \lambda_2)\}$$

其中

$$\begin{aligned} & F(a_1, b_1, n_1, \lambda_1, \lambda_2) \\ & = f_E n_1 a_1 + f_S b_1 \\ & + \lambda_1 \left(\frac{P_E}{2P_E} n_1 + \frac{P_S}{2P_E} b_1 - 1 \right) \\ & + \lambda_2 \left(\frac{U_E}{U_L} a_1 + \frac{U_S}{U_L} b_1 - 1 \right) \end{aligned}$$

我们知道函数的最优值点会出现在梯度为 0 的位置上:

$$\nabla F = \frac{\partial F}{\partial(a_1, b_1, n_1, \lambda_1, \lambda_2)} = 0$$

展开调整方程:

$$\begin{pmatrix} \frac{U_E}{U_L} & \frac{U_S}{U_L} & 0 \\ 0 & \frac{P_S}{2P_E} & \frac{P_E}{2P_E} \\ \frac{P_S}{P_E} & 0 & \frac{U_S}{U_E} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ n_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ f_E \end{pmatrix}$$

求解上述线性方程, 可得:

上式即是综合了成本, 体积和质量的综合最优混合系数。

3 混合储能寿命预测

3.1 补偿能力

假装置每一次应对电压暂降事件所提供的能量 全部用于补偿跌落时的线路电压由能量守恒定律可知 $X_i \propto (V_0^2 - V_i^2)t_i$, 而对于同一站点在一定时期内的电压暂降事件, 可以认为彼此之间独立同分布, 不妨设 X_i 的期望为 $E(X_i) = \mu$, 方差为 $D(X_i) = \sigma^2$, 储能模组的储能能力的估计就变为如下概率问题的求解:

在置信度为 α 时, 求次数 n , 使得 n 次补偿产生所需要的能量总和超过储能模组的储能上限 E_{cap} 的概率不超过 $1 - \alpha$, 即下式:

$$P\left(\sum_{i=1}^n X_i > E_{cap}\right) < 1 - \alpha$$

由概率论的中心极限定理 Lindburg-Levy 定理, 可知, 独立同分布、且数学期望和方差有限的随机变量序列的标准化和以标准正态分布为极限, 即有:

$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i - E(\sum_{i=1}^n X_i)}{\sqrt{D(\sum_{i=1}^n X_i)}} \sim N(0,1)$$

则有

$$P\left(\frac{\sum_{i=1}^n X_i - n\mu}{\sqrt{n}\sigma} > \frac{E_{cap} - n\mu}{\sqrt{n}\sigma}\right) < 1 - \alpha$$

即有

$$\frac{E_{cap} - n\mu}{\sqrt{n}\sigma} = Z_\alpha \dots\dots\dots(1)$$

其中 Z_α 为标准正太分布的 α 分位数。

解(1)式可以解得:

$$n = \left(\frac{-\sigma Z_\alpha + \sqrt{\sigma^2 Z_\alpha^2 + 4\mu E_{cap}}}{2\mu}\right)^2 \dots\dots(*)$$

以深圳地区近三年的电压暂降事件的统计数据按站点及母线级别对数据进行分类后进行归一化计算, 可以看到, 标准化和是逼近标准正态分布的。

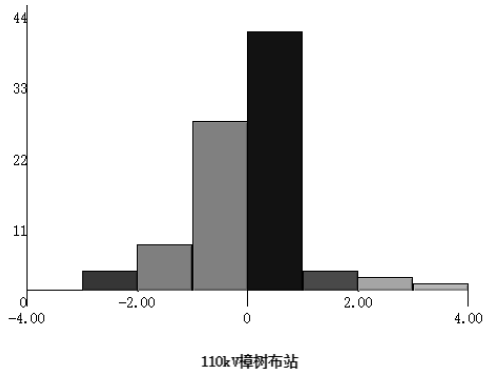


图1 深圳电压暂降事件统计

通常 E_{cap} 都是远大于 σZ_α 的, 那么

$$n \approx \frac{E_{cap}}{\mu} \dots\dots\dots$$

也符合主观的近似推断。

当需要对两组储能装置进行性能比较时:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{E_{cap1}}{E_{cap2}}$$

也即说明储能装置一次充电后, 能够应对电压跌落的次数是与其储能容量的大小是正相关的。

如果将储能单元抽象为服务窗口, 而每次电压跌落补偿看作是对服务窗口的能量

请求, 那么电压暂降的补偿过程可以抽象为一个单窗口的服务队列模型, 每次请求到来的时刻近似服从泊松分布, 结合(*)以及当地电网的电压跌落发生频率便可对补偿装置的实际使用寿命做出更加可信的估计。

3.2 寿命预测

超级电容与蓄电池的使用寿命 L_E 和 L_S 的推导可以基于我们上述(*)中储能设备容量与补偿动作次数之间的概率学模型。

对比当只利用蓄电池补偿跌落能量与利用超级电容与蓄电池混合补偿跌落能量。可知道:

$$\frac{n_a}{n_b} = \frac{n_1 P_E + b_1 P_S}{b_1 P_S}$$

也即蓄电池的寿命被延长到原来的:

$$n_2 = \frac{n_1 P_E + b_1 P_S}{b_1 P_S}$$

倍。若能够推导出可信度高的电压暂降事件到达模型的话, 则可以对产品的实际使用时常进行更科学的预测。

4 综合评价

通过利用雷达图描述不同指标坐标轴围成的区域, 来表示设备的各项性能, 但由于一些指标是递增性指标 (如寿命, 耐压等级, 额定补偿等级等), 而一些指标为递减性指标 (如成本, 体积, 质量等), 因此当这不同指标放在一起时, 彼此的位置关系就会对所谓区域的面积产生不确定的影响, 于是我们从两个方面着手改进了评价指标:

一方面是将指标标准化, 消除量纲和单位长度不一致带来的计算误差, 即规定综合最优解的各项指标的最优值为标准量, 并以此标准量为尺综合衡量产品的实际指标。

另外由于一些指标的递减性, 考虑利用

递减性指标的倒数来使设备的标准化指标的各分量均向递增方向为优。但是虽然统一调整为递增方向，却会带来步进单位不均匀的缺点，所以若要求得六个分量的最优解，可考虑将六个指标相乘，以消除指标之间的相对顺序差异，然后对乘积求最小值方可获得最优的组合比例系数。但六维坐标空间是无法直接呈现在人眼的，所以可以考虑将原先的雷达图分解为递减性指标与递增性指标的两张雷达图，从两个不同的方向来综合审视装置性能。

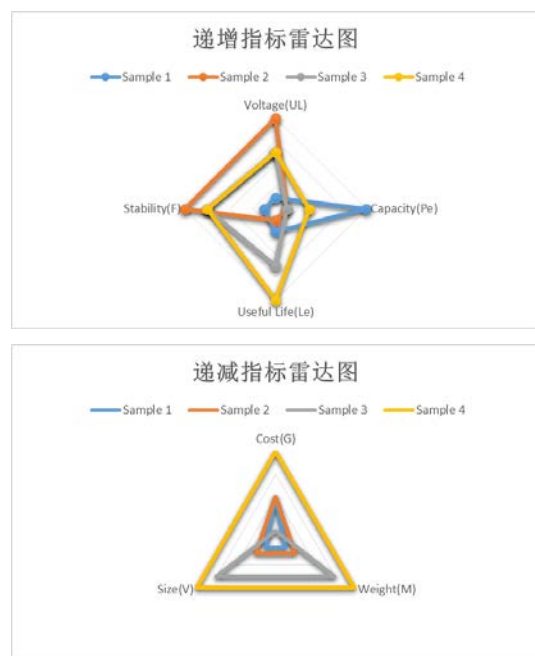


图2 综合评价雷达图

在递增指标图中面积越大的即可认为是产品性能越好，而在递减指标图中面积越小则越优，由这两个方向的指标即可综合评价装置的整体性能。

5 结论

本文讨论了多目标综合优化问题，运用了数学建模和优化工具。产品寿命由于是一个概率意义上的概念，因此未明确将其与产品的其他五项指标直接关联，但是给出的关系，可以用于在产品选型后的使用周期

计算。本文模型能够更加贴切地反应设备的指标性能，并对后续储能装置的开发优化，起到了教示与指导借鉴的作用。

致谢

国家 973 基础研究计划(2013CB228206); 国家自然科学基金(61472200, 61233016); 南方电网公司科技项目 (K-SZ-2012-026)。

参考文献

- [1]. 韩蕃 邓珂琳 曹军威. 基于统一电能质量调节装置储能部的最优化设计模型, 高电压技术(增刊), 2014
- [2]. 金尾 则一, 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」
- [3]. 「プロフェッショナル講座」, トランジスタ技術, 2004.6, P106~P107
- [4]. 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
- [5]. 夏涛, 袁志昌, 《储能并网控制整体方案》, 2013
- [6]. 强国斌, 李忠学, 陈杰. 混合动力车用超级电容能量源建模[J]. 能源技术, 2005, 26(02): 58-61.
- [7]. 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.
- [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.
- [9]. 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.

收稿日期: 2015年9月30日

作者简介:

张华赢(1981-), 男, 籍贯黑龙江大庆, 硕士研究生, 工程师, 从事电能质量监测、治理及管理相关工作。

姚森敬(1969-), 男, 广东潮州人, 高级工程师, 硕士, 从事电能质量管理和高电压技术研究。

曹军威(1973-), 男, 河北乐亭人, 博士, 研究员, 从事分布式计算技术及其在能源电力行业的应用研究。