[电能质量]

基于换流器的优质供电设备综合评价体系研究

文/深圳供电局有限公司　汪　清
华南理工大学　何淇彰
亚洲电能质量产业联盟　黄　炜

提出了基于换流器优质供电设备的综合评价体系，首先考虑电力设备配置情况和应用优质供电技术时的潜在风险，建立了安全性评价体系；然后根据冗余电路设计和换流器拓扑情况，建立了可靠性评价体系；最后对某企业设计的两种优质供电设备配置方案进行综合评估，从而为用户提供决策参考。

随着我国产业结构调整和电力电子技术的飞速发展，配电网中敏感负荷比例不断提高。近年国家大力发展智能装备与机器人、电子通信器件等高新技术制造业和汽车、石化等先进制造业，这些企业对电能质量扰动较为敏感，对供电电能质量要求严苛；同时，电力用户采用越来越多的数字控制自动化设备以提高生产效率，变频调速驱动（Adjustable Speed Drive, ASD）、可编程序逻辑控制器（Programmable Logic Controller, PLC）和计算机（Personal Computer, PC）等设备被广泛应用于工业生产中。这些设备的正常运行依赖于稳定的电压，因而电力用户对电能质量的要求也与日俱增。伴随着电力电子技术的进步，可有效解决电能质量问题的优质供电技术在电力系统中得到了越来越多的应用。电力用户通常采用基于换流器的优质供电设备，以满足更高的电能质量需求。然而，不同电力设备特性各异，因此，有必要对基于换流器的优质供电设备建立综合评价体系，有利于进行设备选型，从而得出安全可靠、优质经济的供电方案。

本文以基于换流器的优质供电设备为对象，首先考虑电力设备配置情况和应用优质供电技术时的潜在风险，建立了安全性评价体系，然后根据冗余电路设计和换流器拓扑情况，建立了可靠性评价体系；接着利用净现值法评估不同电力设备的经济性；最后对某企业设计的两种优质电力设备配置方案进行综合评估，从而为用户优质供电设备比选提供指导，实现安全可靠、优质经济的供电。

安全性评价

安全性评价旨在分析基于换流器的优质供电设备应用过程中的潜在危险，从而得出运行人员人身安全和设备运行安全水平的估计。要对供电设备进行安全性评价，首先划分评价项目，然后根据设备配备情况进行分项评价，最后进行综合评价，得出电力设备整体安全性水平。

运行时间过长或负载率过高会导致设备运行温度升高，通过对大功率电力设备应用冷却技术，不但能降低能量损耗，还能有效防止设备过热爆炸。冷却方式直接影响设备的散热效率，常见的冷却方式有：空气冷却、水冷却、油冷却和蒸发冷却。空气冷却散热效果一般，工艺结构复杂，不适用于对设备紧凑性要求较高的场

基金项目：深圳供电局有限公司科技项目：国际先进供电企业电能质量评价指标与用户治理决策辅助系统建设方案研究（项目编号：090000KK52180127）

合；水冷却对设备绝缘条件要求较高，而且存在冷却线圈结垢影响散热的问题；油冷却方式散热效率较高，且增强了设备的绝缘性能，但由于变压器油具有易燃性，遭遇外部明火或内部故障短路时有可能导致火灾，因而不适合用于严格要求防火的场合；蒸发冷却技术一般采用新氟碳化合物为冷却介质，绝缘性高，冷却效率高，安全性高，适合应用于功率密度较大的电力设备。

储能元件在短时间内完成大功率能量交换，能实现支撑设备运行和能量存储等功能。常见的储能元件有超级电容器、电解电容器、铅酸电池、锂电池和飞轮储能等。超级电容器在高温环境或者过充电情况下容易发生爆炸；电解电容器耐压水平较高，氧化层容易脱落，电解质存在一定腐蚀性，容易老化；铅酸电池在充电过程中，会产生大量的氢气和氧气，混合气体达到一定量时，遇到明火可能会发生爆炸，维修时电池的粉尘可能会导致修理人员铅中毒；锂电池过充电过放电存在安全风险；飞轮储能属于物理储能，相对化学储能，安全性更高。

考虑优质供电设备投运过程中的生产环境或过程中可能存在对设备运行和工作人员人身安全的有害因素，需要对危险源进行识别。

因此，对优质供电设备的安全性进行定性分析，评价内容如表1所示，包括冷却方式、储能元件种类、电击及其他电气危险、着火危险和机械危险5个评价栏目。根据各个评价栏目的得分情况，可以衡量电力设备的安全水平。

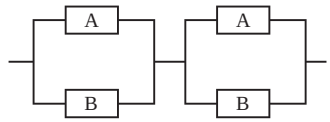
表1　安全性评价表

评价栏目		风险级别
冷却方式	空气冷却	★★
	水冷却	★★
	油冷却	★★★
	蒸发冷却	★
储能元件	超级电容器	★★★★
	电解电容器	★★★
	铅酸电池	★★★
	锂电池	★★★
	飞轮储能	★★
电击及其他危险	漏电	★★★
	累积电荷	★★
着火危险	外部火源	★★★
	内部火源	★★
机械危险	安装不稳定	★★
	锋利边角	★
	振动	★
	运动部件	★★
	跌落或弹出物体	★★★

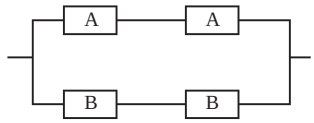
可靠性评价

可靠性评价旨在分析优质供电设备能否在生命周期内，且在正常的使用环境下稳定地工作。进行优质供电设备可靠性评价时，首先划分评价项目；然后根据设备配备情况进行分项评价；最后进行综合评价，得出电力设备整体安全性水平。

采用冗余电路设计能提高设备可靠性，常见的冗余电路设计包括串联、并联、串并和并串四种。当串联电路中元器件数目越多，其防误断可靠性越低，只要有一个元器件开路，整个电路失效。相对地，当所有元器件都失效时，整个电路才失效的电路为并联电路。当并联电路中元器件数目越多，其防误断可靠性越高。串并电路、并串电路示意图如图1所示，当元件可靠性相同时，并串电路相较串并电路可靠性要高。



（a）串联电路



（b）并串电路

图1　电路示意图

优质供电设备大量采用换流器元件，换流器拓扑结构直接影响可靠性。在三电平逆变电路中，每个桥臂上的电子器件承受的电压为输入电压的一半；在二电平逆变电路中，仅由一个电子器件承担全部输入电压。因此，三电平逆变电路中电子器件在开始导通和关断结束时候承受电压为两电平的一半。模块化多电平可以配备冗余，可靠性更高。

因此，对优质供电设备的可靠性进行定性分析，评价内容如表2所示，包括冗余电路设计、换流器拓扑2个评价栏目。根据各个评价栏目的得分情况，可以衡量电力设备的可靠性水平。

表2　可靠性评价表

评价栏目		可靠性级别
冗余电路设计	串联	★
	并联	★★
	串并	★★★
	并串	★★★★
换流器拓扑	两电平	★★
	三电平	★★★
	模块化多电平	★★★★

经济性评价

净现值法利用折现率将项目周期内各年的净效益折算到工程建设初期的现值之和，能较好地反映资金的时间价值。通过采用净现值法对不同优质供电设备进行经济性评价，可以实现方案比选。净现值的计算公式为

$$NPV=\sum_{t=1}^{n}(CI-CO)_t(1+i)^{-t}$$

式中，NPV是净现值；CI是现金流入量；CO是现金流出量；i是电力工业基准收益率或折现率；n是计算周期。

案例分析

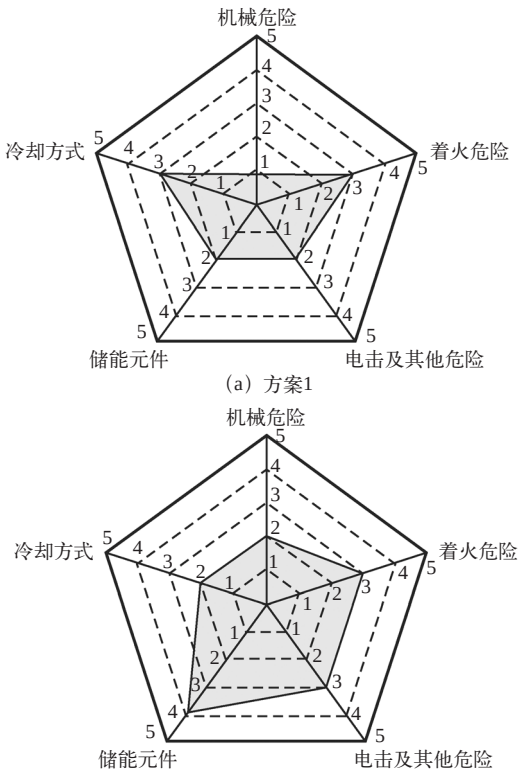
某工业园区内企业A为提高供电可靠性和治理电压暂降，设计了两种优质供电方案：方案1中，电力设备连接方式为并串电路，冷却方式采用油冷却式，储能元件种类为飞轮储能，利用动态电压恢复器治理电压暂降，动态电压恢复器拓扑结构为模块化多电平；方案2中，电力设备连接方式为并联电路，冷却方式采用水冷却式，储能元件为超级电容器，利用动态电压恢复器治理电压暂降，其拓扑结构为三电平。结合实际安装环境和评价栏目，对方案1、方案2进行安全性、可靠性评价，结果如图2、表3所示。

企业A每年由于电压暂降造成的经济损失达到10万元，假定计算周期为5年，折现率为8%，采用优质供电方案后，能治理全部的电压暂降事件，方案1的投资成本为8万元，方案2的投资成本为6万元，分别计算两种方案的净现值，可得方案1的净现值为4.22万元，方案2的净现值为8.44万元。从评价结果可得，方案1安全性和可靠性占优，方案2经济性占优，用户可根据自身需求，选择合适的优质供电设备配置方案。

结束语

本文以基于换流器的优质供电设备为对象，首先根据电力设备冷却模式、储能元件选型和应用优质供电设备时的潜在风险，建立了安全性评价体系，然后考虑冗余电路设计和换流器拓扑情况，提出了可靠性评价体系，接着利用净现值法评估不同方案的经济性，最后对某企业设计的两种优质供电设备配置方案进行综合评估，验证了综合评估体系的可行性，从而为用户提供优质供电设备选型决策参考，有利于实现安全可靠、优质和经济的供电。EA

（收稿日期：2020.08.13）
（编辑：朱金凤）



（a）方案1

（b）方案2

图2　方案安全性评价雷达图

表3　方案可靠性评价比较表

评价栏目	方案1	方案2
冗余电路设计	★★★★	★★
换流器拓扑	★★★★	★★★

声　明

《电气时代》杂志唯一投稿渠道

登录电气时代官网www.eage.com.cn，点击“我要投稿”

咨询电话：68993981