

面向功率冲击平抑的岸电系统储能型电能调控装置容量优化配置策略

刘乾易, 李源, 刘芳, 李尚龙
(中南大学 自动化学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:针对港口岸电系统负荷侧存在的冲击性功率等电能质量问题,提出一种储能型电能调控装置容量优化配置方法。介绍港口岸电系统及储能型电能调控装置拓扑结构,并分析冲击性负荷运行特征;探讨负荷运行工况与功率因数控制目标之间的关系,根据电池荷电状态与负荷运行工况,提出储能型电能调控装置多类型运行工况自适应容量设计的补偿控制策略;建立储能型电能调控装置技术-经济模型,通过在技术模型中考虑岸电系统电能质量的要求建立容量模型,经济模型提供评估寿命成本和效益的方法。基于某港口岸电负荷实测数据,验证所提方法的有效性。

关键词:岸电系统;冲击性功率;电能质量;储能型电能调控装置;容量优化

中图分类号:TM715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202405017

0 引言

建设船舶岸电码头是拓展电能替代广度深度、加快提升全社会电气化水平的重要举措。随着岸电设施覆盖率的提高,大量浮吊承担装卸、搬运货物等任务。当多台浮吊同时工作时,浮吊内部的异步电机同时起动,导致产生的冲击电流叠加,从而造成冲击性功率问题。港口岸电系统每台箱式变压器对多艘浮吊船进行供电,冲击性功率会对配电线路及变压器造成较大危害^[1]。大量冲击性功率会引起低压配电网强功率波动,导致电网电压骤降以及继电保护装置等敏感设备误动作。大量异步电机负荷使得配电网功率因数长期处于较低的状态,岸电系统存在功率因数较低等电能质量问题^[2]。

针对岸电系统出现的冲击性功率问题,现有的解决方法有2种:第1种是进行变压器扩容改造,提高其额定容量;第2种是整定继电器保护值,根据特定周期内的实测数据重新整定定时限过电流保护值和定时限过负荷保护值。第1种方法的问题在于变压器替换成本高昂,且由于岸电系统负荷波动性较大,增容后的变压器容量并不能得到有效利用,这使得增容后的变压器不在经济运行区间。第2种方法的问题在于,由于冲击性功率在不同季度的变化较大,继电器保护值只能根据特定周期的数据进行整定,这使得继电器仍有跳闸风险。投入储能型电能

调控装置,可以实现负荷功率的柔性调控,虽然需要购入成本,但能实现动态功率补偿,不易有跳闸风险。

针对配电网负荷复杂的运行工况,如何兼顾补偿装置对配电网电能质量的改善作用以及整体装置的经济性是补偿装置能够得到应用的关键^[3-4]。文献[5-6]考虑供能灵活性、经济性以及负荷的多场景调节需求,优化配置系统容量。文献[7-8]针对电网受可再生能源出力波动性影响的问题,考虑负荷供应容量、装置经济性和运行效果,建立储能系统容量优化配置模型。文献[9]针对电气化铁路的再生制动能量回收问题,提出考虑削峰填谷的电气化铁路混合储能系统能量管理策略,优化锂电池和超级电容的混合储能系统容量配置。文献[5-9]在能量管理策略方面仅关注不同负荷功率水平下的储能装置输出情况,而未综合考虑储能装置荷电状态与负荷运行工况。文献[10]针对新能源集中开发造成的弃电问题,研究新能源装机规模对储能容量配置的影响。文献[11]针对列车再生制动能量回收问题,考虑功率分层的特性,提出混合储能装置分段配置方案。文献[12]提出一种采用带有能量互补的恒定功率比例能量管理策略,以系统总质量最小为目标进行容量优化。文献[13]为有效提高光伏发电的电能质量和经济效益,建立电池-超级电容混合储能系统年均成本模型进行容量优化配置。但文献[10-13]在利用混合储能装置解决配电网电能质量问题时,往往只关注装置的有功功率输出,而忽略了配电网对有功功率及无功功率综合调控的需求。

本文采用储能型电能调控装置平抑配电网负荷冲击性功率,同时将电池荷电状态与负荷功率相结合,对负荷有功功率、无功功率进行动态补偿,在满

收稿日期:2023-12-15;修回日期:2024-04-28

在线出版日期:2024-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52207146);湖南省科技创新计划项目(2023GK2007)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52207146) and the Science and Technology Innovation Program of Hunan Province(2023GK2007)

足电能质量要求的前提下,对储能型电能调控装置进行容量优化配置,保证整体装置经济性。本文的主要工作如下。

1)根据负荷侧视在功率情况以及锂电池荷电状态,提出储能型电能调控装置多类型运行工况自适应容量设计的补偿控制策略。分析功率因数控制目标和负荷运行工况之间的关系,并给出不同模式下装置的有功功率及无功功率输出。

2)建立储能型电能调控装置技术-经济模型。在技术模型中通过考虑岸电系统电能质量要求建立容量模型,经济模型提供了评估寿命成本和效益的方法。

3)对某港口岸电项目实例进行算例分析,给出在装置不同工作模式下负荷侧和网侧有功功率、无功功率以及视在功率的调节过程。通过对比分析验证本文方法的有效性。

1 系统结构

港口岸电系统如图1所示。10 kV电源经船岸连接设备、电缆收发设备等送至箱变趸船上的0.4 kV / 10 kV箱式变压器,由箱式变压器送电至各浮吊船,供电制式为0.4 kV / 50 Hz。低压母线均采用单母线接线方式,供电方式采用放射式。储能型电能调控装置连接在变压器低压侧。在未采用储能型电能调控装置治理时,岸电系统功率因数水平较低,长期处在0.75以下。

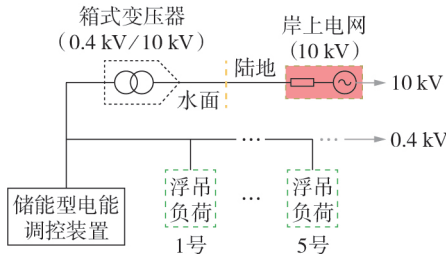


图1 港口岸电系统结构图

Fig.1 Structure diagram of port shore power system

储能型电能调控装置拓扑结构如图2所示。图中: L 为DC / DC回路电感; C 为DC / DC回路电容, V_{dc} 为其两端电压; L_1 为LCL型滤波器靠近储能型电能调控装置侧的电感; L_2 为LCL型滤波器靠近电网侧的电感; C_f 、 R_f 分别为LCL型滤波器的滤波电容和滤波电阻; i_{cA} 、 i_{cB} 、 i_{cC} 为储能型电能调控装置的补偿电流。采用的储能介质为高性能锂电池。装置由DC / DC系统与AC / DC系统两部分组成,AC / DC系统采用两电平三相全桥电路,滤波器为LCL型,实现交直流电压的双向变换;DC / DC系统采用非隔离型Buck / Boost电路,实现电池侧与直流母线侧的升降压变换。

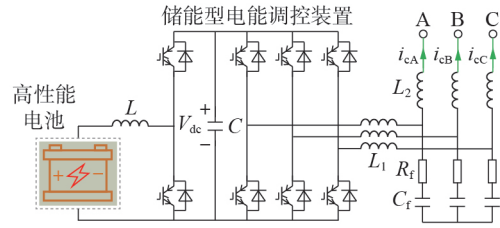


图2 储能型电能调控装置拓扑结构

Fig.2 Topological structure of electric energy regulator with energy storage

2 控制补偿策略

2.1 冲击性负荷运行特征分析

储能型电能调控装置可以对负荷侧有功功率、无功功率进行综合补偿。补偿的目标包括平抑负荷侧出现的冲击性功率以及改善配电网功率因数。针对工作在不同状态的电能调控装置,有功功率、无功功率的补偿优先度也不同。冲击性功率的持续时间一般为几秒到几十秒,负荷功率可以在几秒内达到峰值。图3给出了某港口岸电系统一段时间内的典型负荷变化曲线。

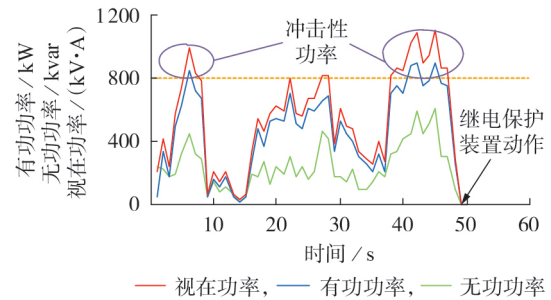


图3 某港口岸电系统一段时间内的典型负荷变化曲线

Fig.3 Typical load variation curves of port shore power system in a period

由图3可以总结得到负荷功率主要表现为冲击性特征:视在功率超过所在线路变压器的额定容量;有功功率峰值可以达到无功功率峰值的2倍左右;单位时间内的有功功率波动率是无功功率波动率的3倍左右,负荷更加明显地呈现出有功冲击的特征。

2.2 能量管理策略

不同荷电状态下储能型电能调控装置的工作模式如表1所示。表中: H 为电池荷电状态; H_{min} 为电池最低荷电状态,电池在荷电状态低于 H_{min} 时将会加速电池老化; H_{max} 为电池最高荷电状态,设定电池管理系统充电上限为容量的80%^[14-15]; H_{mid} 为电池荷电状态 H_{min} 与 H_{max} 的中值,如式(1)所示; S_T 为变压器额定容量; S_{load} 为负荷视在功率; λ 为高峰功率系数,取值范围为0~1; F^* 为期望补偿的功率因数,取值范围为0.90~1.00。

$$H_{mid} = (H_{max} + H_{min}) / 2 \quad (1)$$

表 1 不同荷电状态下储能型电能调控装置的工作模式

Table 1 Working modes of electric energy regulator with energy storage under different states of charge

电池状态	工作模式	工况序号	运行工况	功率因数控制目标		
放电	平抑功率冲击	①	$H_{\text{mid}} < H \leq H_{\text{max}}, S_{\text{load}} \geq S_{\text{T}}$	$F^* \geq 0.90$		
		②	$H_{\text{min}} < H \leq H_{\text{mid}}, S_{\text{load}} \geq S_{\text{T}}$			
		③	$H \leq H_{\text{min}}, S_{\text{load}} \geq S_{\text{T}}$			
	预防高峰功率	④	$H_{\text{mid}} < H \leq H_{\text{max}}, \lambda S_{\text{T}} \leq S_{\text{load}} < S_{\text{T}}$	$F^* \geq 0.95$		
		降低线路损耗	⑤		$H_{\text{mid}} < H \leq H_{\text{max}}, S_{\text{load}} < \lambda S_{\text{T}}$	$F^* = 1.00$
			⑥		$H_{\text{min}} < H \leq H_{\text{mid}}, \lambda S_{\text{T}} \leq S_{\text{load}} < S_{\text{T}}$	
	提升经济收益	⑦	$H_{\text{min}} < H \leq H_{\text{mid}}, S_{\text{load}} < \lambda S_{\text{T}}$	$F^* \geq 0.95$		
		⑧	$H \leq H_{\text{min}}, \lambda S_{\text{T}} \leq S_{\text{load}} < S_{\text{T}}$		$F^* \geq 0.90$	
	延缓电池老化	⑨	$H \leq H_{\text{min}}, S_{\text{load}} < \lambda S_{\text{T}}$	$F^* \geq 0.90$		
充电	充电限幅储能	⑨	$H \leq H_{\text{min}}, S_{\text{load}} < \lambda S_{\text{T}}$	$F^* \geq 0.90$		

负荷运行工况主要分为 3 类,即发生功率冲击、负荷功率水平较高但未发生功率冲击、负荷功率水平较低。同时,需要考虑电池电量,防止电池过充及过放导致电池使用寿命缩短。因此,可以将 9 种运行工况归类为 6 种工作模式。为保证电池的最佳工作状态,将电池荷电状态正常工作范围设定为 20%~80%,电池在此运行范围内的内阻最小,充放电效率最高^[16]。根据负荷视在功率情况及电池荷电状态,将电池分为充电状态和放电状态。工况①—⑧属于放电状态,工况⑨属于充电状态。工作在不同模式下的储能型电能调控装置有不同的功率因数控制目标,负荷运行工况与功率因数控制目标之间的关系如附录 A 所示。

6 种工作模式具体如下。

1) 平抑功率冲击。当发生功率冲击时,储能型电能调控装置的首要目标是平抑冲击性功率。电池放电平抑冲击性功率。考虑到储能型电能调控装置需要输出大量的有功功率来平抑负荷侧出现的冲击性功率,降低此时的功率因数要求,配电网功率因数最低要求为 0.90,将功率因数控制目标设为 $F^* \geq 0.90$ 。此时储能型电能调控装置输出的有功功率和无功功率分别为:

$$\begin{cases} P_c = P_{\text{load}} - 0.9S_{\text{T}} \\ Q_c = Q_{\text{load}} - 0.44S_{\text{T}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_c 为储能型电能调控装置输出的有功功率; P_{load} 为负荷有功功率; Q_c 为储能型电能调控装置输出的无功功率; Q_{load} 为负荷无功功率。将超过变压器额定容量的功率界定为冲击性功率,根据此时的配电网功率因数要求可以求出需要输出的无功功率

大小。

2) 预防高峰功率。在出现冲击性功率前,会有明显的负荷功率迅速上升的过程。如果此时电池的剩余电量较多,则可以补偿负荷高峰功率,将负荷视在功率补偿到 λS_{T} 以下。通过补偿负荷高峰功率可以缓解低压配电网的运行压力。工况④属于未发生功率冲击但负荷功率较大的情况,因此,此时的功率因数控制目标为 $F^* \geq 0.95$ 。此时储能型电能调控装置输出的有功功率和无功功率分别为:

$$\begin{cases} P_c = P_{\text{load}} - 0.95\lambda S_{\text{T}} \\ Q_c = Q_{\text{load}} - 0.31\lambda S_{\text{T}} \end{cases} \quad (3)$$

3) 降低线路损耗。当电池电量较高且负荷视在功率在 λS_{T} 以下时,通过利用储能型电能调控装置调节有功功率及无功功率输出降低线路损耗。线路损耗的计算公式为:

$$\Delta P_{\text{net}} = \frac{P_{\text{net}}^2 + Q_{\text{net}}^2}{U^2} R \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_{\text{net}} = P_{\text{load}} - P_c \\ Q_{\text{net}} = Q_{\text{load}} - Q_c \end{cases} \quad (5)$$

式中: ΔP_{net} 为线路损耗; P_{net} 为网侧有功功率; Q_{net} 为网侧无功功率; R 为网侧线路电阻; U 为网侧线电压。

通过采用无功功率完全补偿策略可以降低线路损耗,可以得到 $Q_{\text{net}} = 0$, 网侧线路损耗为:

$$\Delta P_{\text{net}} = P_{\text{net}}^2 R / U^2 \quad (6)$$

此时储能型电能调控装置输出的有功功率和无功功率分别为:

$$\begin{cases} P_c = 0 \\ Q_c = Q_{\text{load}} \end{cases} \quad (7)$$

需注意的是,在储能型电能调控装置进行无功功率补偿的过程中,电池会对外微弱地放电,且放电功率与变换器内阻成正比。

4) 提升经济收益。当 $H_{\text{min}} < H \leq H_{\text{mid}}$ 且未发生功率冲击时,为了防止电池过放,有功功率输出参考值应为 0,同时限制电池无功功率补偿值大小,但考虑到经济收益情况,将功率因数补偿至 0.95。此时储能型电能调控装置输出的有功功率和无功功率分别为:

$$\begin{cases} P_c = 0 \\ Q_c = Q_{\text{load}} - 0.33P_{\text{load}} \end{cases} \quad (8)$$

5) 延缓电池老化。当电池荷电状态不高于最低荷电状态时,继续放电将会加速电池的容量衰减以及老化^[17]。此时功率因数达到配电网最低标准即可,避免电池放电深度进一步加深导致使用寿命缩短。此时储能型电能调控装置输出的有功功率和无功功率分别为:

$$\begin{cases} P_c = 0 \\ Q_c = Q_{\text{load}} - 0.48P_{\text{load}} \end{cases} \quad (9)$$

6) 充电限幅储能。当 $H \leq H_{\min}$ 且 $S_{\text{load}} < \lambda S_T$ 时, 储能型电能调控装置从配电网吸收电能为电池充电。采用的储能介质为磷酸铁锂的锂电池, 以放电功率 $1/3$ 的倍率进行充电, 设电池额定放电功率为 P_B^N , 此时储能型电能调控装置输出的有功功率和无功功率分别为:

$$\begin{cases} P_c = -\frac{1}{3} P_B^N \\ Q_c = Q_{\text{load}} - 0.48 \left(P_{\text{load}} + \frac{1}{3} P_B^N \right) \end{cases} \quad (10)$$

当配电网功率因数 F 达到 0.90 或以上时, 有:

$$\begin{cases} P_c = -\frac{1}{3} P_B^N \\ Q_c = 0 \end{cases} \quad (11)$$

3 储能型电能调控装置技术-经济模型

建立储能型电能调控装置技术-经济模型, 为方便分析, 此处定义储能型电能调控装置由电池储能系统和储能变流器组成, 电池储能系统由电池以及 DC/DC 变换器组成。

3.1 技术模型

1) 电池储能系统技术模型。

储能型电能调控装置通过电池放电经 DC/DC 变换器、储能变流器平抑负荷侧出现的冲击性功率, 需要优化配置电池的额定输出功率以及电量。对电池储能系统的充电效率、放电效率和 DC/DC 变换器效率进行建模, 可表示为:

$$E_B(t) = P_B(t) \Delta t + E_B(t-1) \quad (12)$$

$$H(t) = E_B(t) / E_B^N \quad (13)$$

$$H(t) - H(t + \Delta t) = \gamma_B \gamma_{\text{DC}} \gamma_{\text{PCS}} \frac{P_B(t) \Delta t}{E_B^N} \quad (14)$$

式中: $E_B(t)$ 、 $P_B(t)$ 、 $H(t)$ 分别为 t 时刻电池的电量、输出功率和荷电状态; Δt 为时间间隔; E_B^N 为锂电池的额定电量; γ_B 、 γ_{DC} 、 γ_{PCS} 分别为电池的充放电效率、DC/DC 变换器工作效率和储能变流器工作效率。

2) 储能变流器技术模型。

10 kV 线路继电保护装置安装在变压器高压侧, 当出现冲击性功率时, 继电保护装置可能会误动作。通过在变压器低压侧安装储能型电能调控装置可以防止配电网 10 kV 线路继电保护装置误动作, 需要对储能型电能调控装置变流器容量进行设计。电流速断保护和带时限电流保护 I 段以负荷侧短路电流进行整定, 阈值设定得较高, 而定时限电流保护 II 段以最大负荷电流进行整定, 阈值设定得较低。当发生功率冲击时, 功率冲击电流只会影响带时限电流保护 II 段, 储能型电能调控装置必须及时做出反应并补偿冲击性功率, 使得带时限电流保护 II 段不会由于冲击性功率而误动作。负荷视在功率超出变

器额定容量会对变压器以及线路造成不可逆的损害^[18], 因此需对冲击性功率进行补偿。

带时限电流保护 II 段整定计算公式为:

$$I_{\text{set. II}} = \frac{K_{\text{rel}} K_{\text{jx}}}{K_r} I_n \quad (15)$$

式中: $I_{\text{set. II}}$ 为带时限电流保护 II 段动作电流; K_{rel} 为可靠系数; K_{jx} 为接线系数; K_r 为继电器返回系数; I_n 为变压器二次侧额定电流。

因此, 储能变流器最低容量可设计为:

$$S_{\text{PCS}} \geq \min(S_i) - S_T \quad i=0, 1, \dots, t_{\text{II}} \text{ 且 } S_i > S_T \quad (16)$$

式中: S_{PCS} 为储能变流器容量; S_i 为会造成变压器继电保护装置误动作的冲击性功率, i 为 $0 \sim t_{\text{II}}$ 内以 1 s 为单位的时间间隔索引值, t_{II} 为带时限电流保护 II 段动作时间整定值。

计及继电保护装置的動作时间, 设计变流器容量, 储能变流器通过调节有功功率及无功功率输出保证继电保护装置不会由于冲击性功率而误动作。同时, 存在冲击性功率峰值过大而储能型电能调控装置无法完全平抑的特殊情况, 因此定义冲击性功率平抑率为:

$$\delta = \left(1 - \frac{t_{\text{after}}}{t_{\text{before}}} \right) \times 100\% \quad (17)$$

式中: δ 为冲击性功率平抑率; t_{after} 为储能型电能调控装置投入后的网侧冲击性功率存在时间; t_{before} 为储能型电能调控装置投入前的网侧冲击性功率存在时间。当 $\delta=100\%$ 时, 储能型电能调控装置能够完全平抑冲击性功率。

负荷数据以及继电保护装置的動作时间决定了变流器容量的最小值。变流器输出的有功功率全部由电池储能系统提供, 输出的无功功率由负荷侧无功功率以及功率因数控制目标决定, 因此, 变流器容量可以写成关于 P_B^N 、 S_{load} 、 F^* 的函数, 即:

$$S_{\text{PCS}} = \sqrt{\left(P_B^N \gamma_B \gamma_{\text{DC}} \gamma_{\text{PCS}} \right)^2 + \left[S_{\text{load}} \sqrt{1 - (F^*)^2} \right]^2} \quad (18)$$

式(18)可以改写成:

$$P_B^N = \frac{\sqrt{S_{\text{PCS}}^2 - \left[S_{\text{load}} \sqrt{1 - (F^*)^2} \right]^2}}{\gamma_B \gamma_{\text{DC}} \gamma_{\text{PCS}}} \quad (19)$$

γ_B 、 γ_{DC} 、 γ_{PCS} 、 S_{load} 均为已知量, F^* 在 0.90~1.00 内取值。

当 $F^*=0.90$ 时, P_B^N 取得最小值, 因此, P_B^N 必须满足:

$$P_B^N \geq \frac{\sqrt{S_{\text{PCS}}^2 - 0.19 S_{\text{load}}^2}}{\gamma_B \gamma_{\text{DC}} \gamma_{\text{PCS}}} \quad (20)$$

3.2 经济模型

为岸电系统安装储能型电能调控装置需要一定

的成本。此外,储能型电能调控装置能够平抑岸电系统出现的冲击性功率,同时能够提高岸电系统的功率因数,从而带来一定的经济收益。因此,将经济模型分为成本模型和收益模型。

1) 成本模型。

储能型电能调控装置的成本包括购置成本和维护成本。装置采用的电池为磷酸铁锂电池,在装置整个寿命周期内更换电池还会产生一定的更换成本。具体而言,装置的购置成本 C_{CAP} 包括变流器购置成本、DC/DC 转换器购置成本和磷酸铁锂电池购置成本,即:

$$C_{\text{CAP}} = \lambda_1 S_{\text{PCS}} + \lambda_2 P_{\text{B}}^{\text{N}} + \lambda_3 E_{\text{B}}^{\text{N}} \quad (21)$$

式中: λ_1 、 λ_2 分别为变流器和锂电池单位功率的成本价格; λ_3 为锂电池单位电量的成本价格。

维护成本主要为锂电池的维护成本,随着使用时间的增加而增加。维护成本 C_{ONG} 可表示为:

$$C_{\text{ONG}} = \sum_{j=1}^T \left[\lambda_4 E_{\text{B}}^{\text{N}} (1+n_{\text{m}})^j (1+n_{\text{d}})^{-j} \right] \quad (22)$$

式中: T 为系统寿命,单位为 a; λ_4 为锂电池维护成本单价; n_{m} 为维护成本的增长率; n_{d} 为未来资金贬值率。

磷酸铁锂电池在储能型电能调控装置的应用中需要频繁充放电,因此必须考虑更换成本 C_{REP} , 即:

$$C_{\text{REP}} = \sum_{k=1}^{n_{\text{i}}} \left[(\lambda_2 P_{\text{B}}^{\text{N}} + \lambda_3 E_{\text{B}}^{\text{N}}) (1+n_{\text{d}})^{-kT_{\text{B}}} \right] \quad (23)$$

式中: n_{i} 为替换次数, $n_{\text{i}} = T/T_{\text{B}} - 1$, T_{B} 为锂电池等效循环寿命,单位为 a。采用雨流计数法计算锂电池等效循环寿命 $T_{\text{B}}^{[9]}$, 即:

$$T_{\text{B}} = \frac{Z(1)}{\sum Z_{\text{DOD}}} \quad (24)$$

式中: Z_{DOD} 为不同放电深度对应的循环次数折算到全充全放下等效循环次数 $Z(1)$ 的折算值。

2) 收益模型。

a) 电费奖励。总电费为电量电费和基本电费之和。通过投入储能型电能调控装置改善配电网功率因数可以获得电费奖励。电费奖励以月为单位计算,不同功率因数下的电费奖励额度不同,如附录 B 表 B1 所示。每月总电费为:

$$M_{\text{charge}} = B_{\text{charge}} + Q_{\text{charge}} \quad (25)$$

式中: M_{charge} 为每月总电费; B_{charge} 为每月基本电费; Q_{charge} 为每月电量电费。

因投入储能型电能调控装置带来功率因数改善而获得的收入 B_{REW} 为:

$$B_{\text{REW}} = 12TM_{\text{dec}} M_{\text{charge}} \quad (26)$$

式中: M_{dec} 为月电费减免系数。

b) 电费惩罚。根据《功率因数调整电费办法》,当功率因数低于 0.90 时,需要额外增收电费。电费

惩罚以月为单位计算,不同功率因数的电费增收程度不同,如附录 B 表 B2 所示。在投入储能型电能调控装置前因功率因数过低而造成的电费惩罚 B_{PUN} 为:

$$B_{\text{PUN}} = 12TM_{\text{inc}} M_{\text{charge}} \quad (27)$$

式中: M_{inc} 为月电费增收系数。在投入储能型电能调控装置后,这部分电费惩罚被弥补,因此也将其作为收益的一部分。

此外,在寿命结束时回收整个系统会有一定的收益。对于储能型电能调控装置,该收益取决于锂电池的剩余寿命,即:

$$B_{\text{EOL}} = (\lambda_2 P_{\text{B}}^{\text{N}} + \lambda_3 E_{\text{B}}^{\text{N}}) (1+n_{\text{d}})^{T_{\text{r}}} \quad (28)$$

$$T_{\text{r}} = (n_{\text{i}} + 1)T_{\text{B}} - T \quad (29)$$

式中: B_{EOL} 为系统回收收益; T_{r} 为剩余寿命。

结合式(21)–(29),储能型电能调控装置的总成本 C 为:

$$C = C_{\text{CAP}} + C_{\text{ONG}} + C_{\text{REP}} - B_{\text{REW}} - B_{\text{PUN}} - B_{\text{EOL}} \quad (30)$$

3.3 储能型电能调控装置优化配置模型

本文建立储能型电能调控装置的技术-经济模型,模型约束包括锂电池功率约束、荷电状态约束、功率因数约束、电量约束、最低额定功率约束以及储能变流器最低容量设计约束,如附录 C 所示。需要达到的电能质量要求为:能够平抑负荷侧出现的冲击性功率;提高岸电系统配电网功率因数。在满足这 2 个电能质量要求的前提下,要使得储能型电能调控装置的总成本最低,因此,本文的优化目标为总成本最低,将电能质量要求作为约束条件。对于多变量单目标优化问题,可以采用粒子群优化算法进行求解。

目标函数为:

$$\min C = C_{\text{total}} - B_{\text{total}} = f(P_{\text{B}}^{\text{N}}, E_{\text{B}}^{\text{N}}, S_{\text{PCS}}) \quad (31)$$

$$C_{\text{total}} = C_{\text{CAP}} + C_{\text{ONG}} + C_{\text{REP}} \quad (32)$$

$$B_{\text{total}} = B_{\text{REW}} + B_{\text{PUN}} + B_{\text{EOL}} \quad (33)$$

4 算例分析

基于某港口岸电系统 30 d 的负荷运行数据进行算例分析,各参数如附录 B 表 B3 所示。采用的锂电池为磷酸铁锂电池。

4.1 容量优化结果

储能型电能调控装置容量优化结果如表 2 所示。最终优化后的总成本为 42.5 万元,冲击性功率平抑率达到 95%,基本满足岸电系统冲击性功率平抑要求。

4.2 性能测试结果

将负荷运行数据、优化后的电能调控装置基本参数导入 MATLAB 软件,根据所建立的目标函数及约束条件编写代码。当系统工作在功率冲击模式

表2 储能型电能调控装置容量优化结果
Table 2 Capacity optimization results of electric energy regulator with energy storage

类别	参数	取值
优化变量	锂电池电量	28.9 kW·h
	锂电池功率	160 kW
	储能变流器容量	235 kV·A
优化目标	总成本	42.5 万元
运行效果	冲击性功率平抑率	95%

时,储能型电能调控装置调节无功功率及有功功率输出,平抑负荷侧出现的冲击性功率,网侧和负荷侧功率如图4所示。此时由于平抑功率冲击的需要,网侧功率因数要求达到0.90即可。

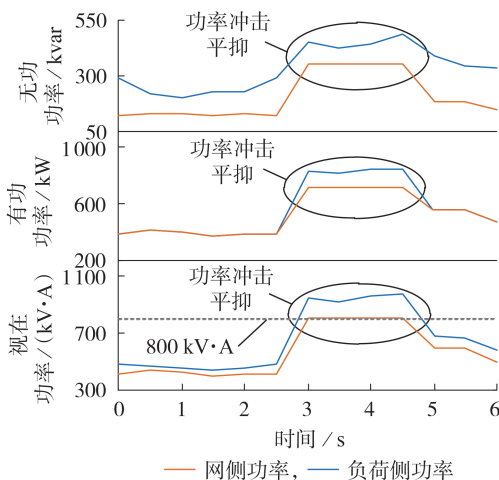


图4 平抑功率冲击模式下的网侧和负荷侧功率
Fig.4 Power at grid side and load side under smoothing power impact mode

储能型电能调控装置在其他几种工作模式下的网侧和负荷侧功率如附录D所示。

5 方法对比

为了突显本文方法的优势,表3给出了当前常用的储能容量配置方法与本文方法的对比。其中:文献[9]采用锂电池加超级电容的储能方式来实现

表3 本文方法与现有文献方法的对比

Table 3 Comparison among proposed method and current literature methods

方法	技术模型			经济模型	能量管理策略		
	装置拓扑	变流器效率	多元件容量耦合关系		负荷工况	电池荷电状态	功率因数控制目标
文献[9]方法	—	√	—	成本、收益	P_{load}	—	—
文献[13]方法	—	—	—	成本	P_{load}	—	—
本文方法	√	√	√	成本、收益	S_{load}	√	√

注:“—”表示未采用相应方法,“√”表示采用相应方法。

电气化铁路再生制动能量的回收利用;文献[13]采用铅酸电池加超级电容的储能方式,为光伏电站配置适当容量的储能系统。

本文从系统的技术建模、经济建模、能量管理策略上对储能配置方案进行对比分析,具体如下。

1)本文方法考虑储能型电能调控装置在平抑功率冲击和改善港口岸电系统功率因数2个方面的综合功能,在满足电能质量要求的基础上,对储能型电能调控装置进行容量优化配置,目标涉及技术模型和经济模型。

2)本文技术模型考虑容量设计中储能变流器容量、DC/DC系统容量、锂电池电量之间的相互影响关系(即多元件容量耦合关系),因此,在技术建模中将各部分作为一个整体进行容量优化设计,同时考虑装置拓扑以及变流器效率对容量设计的影响。相较于文献[9]和文献[13]方法,本文方法的容量优化配置结果更加合理。

3)在能量管理策略上,本文考虑负荷视在功率以及电池荷电状态之间的关系,并且给出不同模式下的功率因数控制目标。相较于文献[9]以及文献[13]方法,本文方法的负荷运行工况划分结果更加详细。

6 结论

本文针对港口岸电系统负荷侧存在的冲击性功率等电能质量问题,提出储能型电能调控装置容量优化配置方法。在满足负荷冲击性功率基本得到平抑、功率因数基本达到0.90以上等要求的前提下,优化配置储能型电能调控装置。主要结论如下。

1)本文分析冲击性功率的运行特征,根据负荷侧视在功率情况以及锂电池荷电状态,提出储能型电能调控装置多类型运行工况自适应容量设计的补偿控制策略。确定负荷功率情况与功率因数控制目标之间的关系。

2)建立储能型电能调控装置技术-经济模型。在技术模型中主要考虑岸电系统的电能质量要求,建立有关变流器容量、锂电池容量以及电量之间的数学表达式。在经济模型中考虑装置成本以及收益情况。最终建立关于装置总成本的单目标多变量优化函数。

3)对某港口岸电项目实例进行算例分析,给出储能型电能调控装置在不同工作模式下的网侧和负荷侧有功功率、无功功率以及视在功率的调节过程。采用本文方法可以基本解决岸电系统的功率冲击问题,功率冲击平抑率达到了95%。本文方法与现有文献方法的对比结果表明,本文方法得到的能量管理策略更加合理,并且技术模型以及经济模型更加准确。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 毛志宇,李培强,马德鑫,等. 基于风功率波动平抑的复合储能两次功率分配容量配置方法研究[J]. 电网技术,2023,47(10):4111-4123.
MAO Zhiyu, LI Peiqiang, MA Dexin, et al. Double power allocation of capacity configuration of compound energy storage based on wind power smoothing[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4111-4123.
- [2] WANG J D, PANG W J, WANG L P, et al. Synthetic evaluation of steady-state power quality based on combination weighting and principal component projection method[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(2): 160-166.
- [3] CHEN J Y, HU H T, GE Y B, et al. Techno-economic model-based capacity design approach for railway power conditioner-based energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(5): 4730-4741.
- [4] SINGH Y, SINGH B, MISHRA S. Control of single-phase distributed PV-battery microgrid for smooth mode transition with improved power quality[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(5): 6286-6296.
- [5] 杜锡力,李笑竹,陈来军,等. 面向多场景调节需求的集中式共享储能鲁棒优化配置[J]. 电工技术学报,2022,37(23):5911-5921.
DU Xili, LI Xiaozhu, CHEN Laijun, et al. Robust and optimized configuration of centralized shared energy storage for multi-scenario regulation demand[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 5911-5921.
- [6] 孙璐瑶,陈来军,熊宇峰,等. 考虑光热集热单元的氢储能热电联供综合能源系统容量优化配置[J]. 电力自动化设备,2023,43(12):70-76.
SUN Luyao, CHEN Laijun, XIONG Yufeng, et al. Capacity optimization configuration of hydrogen energy storage cogeneration integrated energy system considering photothermal collector module[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 70-76.
- [7] 陆秋瑜,马千里,魏犇,等. 基于置信容量的风场配套储能容量优化配置[J]. 电工技术学报,2022,37(23):5901-5910.
LU Qiuyu, MA Qianli, WEI Wei, et al. Optimal configuration of energy storage parameters based on confidence capacity of wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 5901-5910.
- [8] 齐晓光,姚福星,朱天瞳,等. 考虑大规模风电接入的电力系统混合储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):11-19.
QI Xiaoguang, YAO Fuxing, ZHU Tiantong, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage in power system considering large-scale wind power integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 11-19.
- [9] 张育维,胡海涛,耿安琪,等. 考虑削峰填谷的电气化铁路混合储能系统容量优化配置[J]. 电力自动化设备,2023,43(2):44-50.
ZHANG Yuwei, HU Haitao, GENG Anqi, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage system for electrified railway considering peak load shifting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2): 44-50.
- [10] 代倩,吴俊玲,秦晓辉,等. 提升局部区域新能源外送能力的储能容量优化配置方法[J]. 电力系统自动化,2022,46(3):67-74.
DAI Qian, WU Junling, QIN Xiaohui, et al. Optimal configuration method of energy storage capacity for improving delivery ability of renewable energy in regional area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 67-74.
- [11] 李欣,卢景涛,肖林润,等. 高速铁路列车长大坡道混合储能系统容量优化配置[J]. 电工技术学报,2023,38(20):5645-5660.
LI Xin, LU Jingtao, XIAO Linrun, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage system for long steep slope of high-speed railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5645-5660.
- [12] 王桂博,丁晓霞,王法印. 有轨电车混合储能系统的能量管理策略与容量优化[J]. 电子设计工程,2024,32(2):130-133.
WANG Guibo, DING Xiaoxia, WANG Fayin. Energy management strategy and capacity optimization of tram hybrid energy storage system[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(2): 130-133.
- [13] 韩晓娟,程成,籍天明,等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报,2013,33(34):91-97.
HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-97.
- [14] 周才杰,汪玉洁,李凯铨,等. 基于灰色关联度分析-长短期记忆神经网络的锂离子电池健康状态估计[J]. 电工技术学报,2022,37(23):6065-6073.
ZHOU Caijie, WANG Yujie, LI Kaiquan, et al. State of health estimation for lithium-ion battery based on gray correlation analysis and long short-term memory neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 6065-6073.
- [15] 余洋,陈东阳,吴玉威,等. 风电跟踪调度计划时降低寿命损耗的电池储能分组控制策略[J]. 电力自动化设备,2023,43(3):54-62.
YU Yang, CHEN Dongyang, WU Yuwei, et al. Grouping control strategy of battery energy storage for reducing life loss under wind power tracking scheduling plan[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 54-62.
- [16] HARIS M, HASAN M N, QIN S. Degradation curve prediction of lithium-ion batteries based on knee point detection algorithm and convolutional neural network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71(1): 1-10.
- [17] 孙丙香,任鹏博,陈育哲,等. 锂离子电池在不同区间下的衰退影响因素分析及任意区间的老化趋势预测[J]. 电工技术学报,2021,36(3):666-674.
SUN Bingxiang, REN Pengbo, CHEN Yuzhe, et al. Analysis of influencing factors of degradation under different interval stress and prediction of aging trend in any interval for lithium-ion battery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 666-674.
- [18] 李锦飞. 浅谈重、过载配电变压器治理[J]. 电气技术,2018,19(7):118-120.
LI Jinfei. Talk about the management of heavy load or overload distribution transformer[J]. Electrical Engineering, 2018, 19(7): 118-120.

作者简介:

刘乾易(1992—),男,讲师,博士,主要研究方向为新型配电网电能优质调控技术(**E-mail**:liu7y@foxmail.com);

李源(2003—),男,硕士研究生,主要研究方向为新型配电网电能优质调控技术(**E-mail**:234612224@csu.edu.cn);

刘芳(1982—),女,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统控制、数据驱动、时滞系统、鲁棒控制(**E-mail**:csuliufang@csu.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Capacity optimization allocation strategy of electric energy regulator with energy storage for power shock suppression in shore power system

LIU Qianyi, LI Yuan, LIU Fang, LI Shanglong

(School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Aiming at the power quality problems such as impact power on the load side of port shore power system, a capacity optimization method of electric power regulator with energy storage is proposed. The topological structures of port shore power system and electric energy regulator with energy storage are introduced, and the operation characteristic of impact load is discussed. The relationship between load operation condition and power factor control objective is analyzed. According to the state of charge of battery and load operation condition, a compensation control strategy for adaptive capacity design of electric power regulator with energy storage under multiple operation conditions is proposed. A technical-economic model of electric energy regulator with energy storage is established, a capacity model is built by considering the power quality requirements of shore power system in the technical model, and the economic model provides a method to evaluate the life cost and benefit. Based on the measured data of port shore load, the effectiveness of the proposed method is verified.

Key words: shore power system; impact power; power quality; electric energy regulator with energy storage; capacity optimization

(上接第36页 continued from page 36)

Optimal configuration method of synchronous condenser to improve delivery capacity of new energy cluster in weak grid

WANG Zesen¹, LIU Miao¹, LI Haibo², QIN Jianru², GUO Jinzhi¹, BAI Kai¹

(1. State Grid Jibe Electric Power Co., Ltd., Beijing 100054, China;

2. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, Chengdu 610213, China)

Abstract: In view of the technical requirements for improving the strength of the weak grid at sending end and the new energy accommodation capacity, the relationship between the short circuit ratio index and the delivery capacity of the new energy cluster is analyzed. The influence of synchronous condenser access on short circuit ratio index is analyzed. A bi-level optimal model of synchronous condenser configuration considering the strength of weak grid system and the consumption of new energy cluster is established. The inner layer model takes the maximum output of each new energy station as the goal, determining the maximum output limit of each new energy station under the constraint of short circuit ratio. The outer layer model takes the minimum configuration capacity of synchronous condenser as the goal, calculating the difference between the actual output and the maximum output limit of each new energy station, and checking the configuration capacity of synchronous condenser. The simulation analysis of the actual typical power grid shows that the system strength is greatly improved after the optimal configuration of synchronous condenser. At the same time, the maximum accommodation space of 98% new energy stations can reach 95% of the theoretical maximum accommodation space of each new energy station.

Key words: weak grid system; short circuit ratio; new energy accommodation; synchronous condenser; optimal configuration

附录 A:

当负荷侧发生功率冲击，需要将负荷侧功率平抑至变压器额定容量大小，配电网对功率因数的最低要求为 0.9，因此功率因数控制目标的变化范围为[0.9, 1.0]。此时变流器的有功功率和无功功率输出分别为：

$$\begin{cases} P_c = P_{\text{load}} - S_T \cdot F^* \\ Q_c = Q_{\text{load}} - S_T \cdot \sqrt{1 - F^{*2}} \end{cases} \quad (\text{A1})$$

式中， P_{load} 、 Q_{load} 、 P_c 、 Q_c 分别为负荷侧有功功率，负荷侧无功功率，变流器输出有功功率，变流器输出无功功率。

此时对应的变流器容量设计大小应为：

$$\begin{aligned} S_{\text{PCS}} &= \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad (\text{A2}) \\ &= \sqrt{(P_{\text{load}} - S_T F^*)^2 + (Q_{\text{load}} - S_T \sqrt{1 - F^{*2}})^2} \\ &= \sqrt{S_{\text{load}}^2 + S_T^2 - 2P_{\text{load}} S_T F^* - 2Q_{\text{load}} S_T \sqrt{1 - F^{*2}}} \end{aligned}$$

式中， S_{load} 、 S_T 、 P_{load} 、 Q_{load} 均为已知量，且在电能质量问题补偿优先度中已经提到，有功功率峰值是无功功率峰值的两倍左右。讨论 F^* 对 S_{PCS} 设计的影响。将式(A2)看成关于 F^* 的函数，函数可以简化为：

$$t = -\sqrt{1 - F^{*2}} - 2F^* \quad F^* \in [0.9, 1.0] \quad (\text{A3})$$

针对式(A3)求一阶导数可以得到：

$$dt / dF^* = \frac{F^*}{\sqrt{1 - F^{*2}}} - 2 \quad F^* \in [0.9, 1.0] \quad (\text{A4})$$

继续求导可以得到式(A5)：

$$d^2 t / dF^{*2} = \frac{1}{(1 - F^{*2})^{3/2}} \geq 0 \quad F^* \in [0.9, 1.0] \quad (\text{A5})$$

因此， dt/dF^* 函数在 $F^* \in [0.9, 1.0]$ 单调递增，当 $F^*=0.9$ 时， $dt/dF^* > 0$ ，所以 dt/dF^* 在 $[0.9, 1.0]$ 区间恒大于零。因此函数 t 在 $[0.9, 1.0]$ 上单调递增，从而得到 $S_{\text{PCS}} = f(F^*)$ 在 $[0.9, 1.0]$ 上单调递增。这意味着当发生功率冲击时，如果同样将负荷视在功率平移至变流器额定容量时，功率因数要求越高，所需的变流器容量越大。对于同一容量的变流器，功率因数要求越高，此时对岸电系统配电网冲击性负荷平抑能力越差。因此，当发生功率冲击时，降低配电网的功率因数控制目标有利于平抑负荷侧出现的冲击性功率；当负荷功率水平较低时，可以适当提高功率因数控制目标来提升经济效益。

附录 B:

表 B1 不同功率因数电费奖励

实际功率因数	月电费减少%
0.90	0
0.91	0.15
0.92	0.30
0.93	0.45
0.94	0.60
0.95~1.00	0.75

表 B2 不同功率因数电费惩罚

实际功率因数	月电费增收	实际功率因数	月电费增收
0.89	0.5	0.76	7.0
0.88	1.0	0.75	7.5
0.87	1.5	0.74	8.0
0.86	2.0	0.73	8.5
0.85	2.5	0.72	9.0
0.84	3.0	0.71	9.5
0.83	3.5	0.70	10.0
0.82	4.0	0.69	11.0
0.81	4.5	0.68	12.0
0.80	5.0	0.67	13.0
0.79	5.5	0.66	14.0
0.78	6.0	0.65	15.0
0.77	6.5	≤0.64	增收 2%

表 B3 储能型电能调控装置基本参数

Table B3 Basic parameters of electric power regulator with energy storage

参数	数值
变压器额定容量 S_T / (kV A)	800
变流器功率成本系数 λ_1 / [万元 (MV A) ⁻¹]	46
锂电池功率成本系数 λ_2 / (元 kW ⁻¹)	1400
锂电池电量成本系数 λ_3 / (元 (kW h) ⁻¹)	1600
锂电池维护成本系数 λ_4 / [元 (kW h) ⁻¹ 月]	0.1
充放电效率 γ_B	0.95
DC/DC 变换器效率 γ_{DC}	0.98
变流器(PCS)效率 γ_{PCS}	0.978
系统寿命 T / 年	15
维护成本的增长率 n_m / %	5
未来资金贬值率 n_d / %	3.5
电流保护 II 段动作时间 t_{II} / s	6

附录 C:

模型约束:

1) 锂电池功率约束。采用储能介质为磷酸铁锂的锂电池, 以最大放电功率三分之一的倍率进行充电。锂电池放电功率应当不大于其额定输出功率, 充电功率应当小于其额定充电功率。 P_B 为锂电池功率, 为正表示放电, 为负表示充电。

$$0 \leq P_B \leq P_B^N \quad (C1)$$

$$-\frac{1}{3}P_B^N \leq P_B \leq 0 \quad (C2)$$

2) 荷电状态约束。为保证锂电池的工作效率以及寿命, 锂电池电量存在最佳区间, 当电池荷电状态在 0.2~0.8 之间时, 锂电池表现最佳。

$$H_{\min} \leq H \leq H_{\max} \quad (C3)$$

3) 功率因数控制目标约束。为提高配电网电能质量, 降低由于无功功率带来的线路损耗等各方面的电能质量问题, 以及各地电网对于功率因数的硬性要求, 电能调控装置调节有功功率、无功功率输出, 将配电网功率因数保持在 0.9 及以上。

$$F_{\text{avg}} = \frac{\int P_{\text{net-M}} dt}{\sqrt{\left(\int P_{\text{net-M}} dt\right)^2 + \left(\int Q_{\text{net-M}} dt\right)^2}} \geq 0.9 \quad (C4)$$

式中, F_{avg} 为一个月时间内的平均功率因数, $\int P_{\text{net-M}} dt$ 表示一个月时间内有功功率对时间的积分, $\int Q_{\text{net-M}} dt$ 表示一个月时间内无功功率对时间的积分。

4) 电量约束。锂电池电量必须高于冲击性功率最严重一天内超过变压器额定容量以上的电量, 即电池的电量需要满足配电网功率波动平抑的最大需求。电池电量不足会导致配电网电能质量要求不达标。

$$\gamma_B \gamma_{\text{DC}} \gamma_{\text{PCS}} E_B^N \geq \Delta E_{\max} \quad (C5)$$

式中, ΔE_{\max} 为冲击性功率最严重一天内超过变压器额定容量以上的电量。

同时考虑式(16)储能变流器最低容量设计约束以及式(20)锂电池额定功率大小约束, 整体约束条件为:

$$\begin{cases} -P_B^N \leq P_B \leq P_B^N \\ H_{\min} \leq H \leq H_{\max} \\ F_{\text{avg}} = \frac{\int P_{\text{net-M}} dt}{\sqrt{\left(\int P_{\text{net-M}} dt\right)^2 + \left(\int Q_{\text{net-M}} dt\right)^2}} \geq 0.9 \\ \gamma_B \gamma_{\text{DC}} \gamma_{\text{PCS}} E_B^N \geq \Delta E_{\max} \\ S_{\text{PCS}} \geq [\min(S_i) - S_T] \quad (i = 0 \sim t_{\text{II}} \ \& \ S_i > S_T) \\ P_B^N \geq \frac{\sqrt{S_{\text{PCS}}^2 - 0.19S_{\text{load}}^2}}{\gamma_B \gamma_{\text{DC}} \gamma_{\text{PCS}}} \end{cases} \quad (C6)$$

附录 D:

图 D1 系统工作在预防高峰功率模式时, 此时由于锂电池电量充足, 针对负荷侧出现的功率高峰, 将负荷侧视在功率降低至 640 kV A。

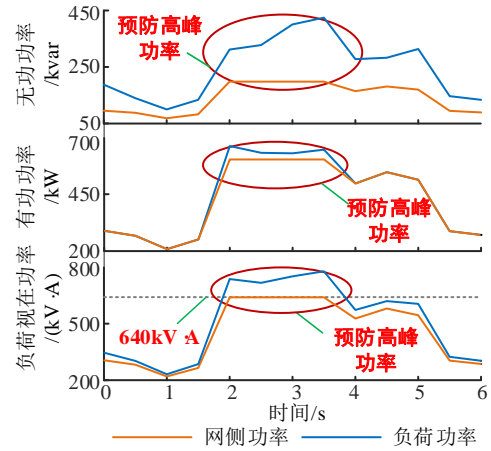


图 D1 预防高峰功率模式下网侧、负荷侧功率情况

Fig.D1 Power at the grid-side and load-side under the mode of preventing peak power

当负荷侧功率水平较低时, 由于锂电池电量较高, 图 D2 系统工作在降低线路损耗模式, 增大无功功率输出, 采用完全补偿的方式, 由式(4)~(6)可知, 完全补偿负荷侧无功功率可以起到降低线路损耗的作用。

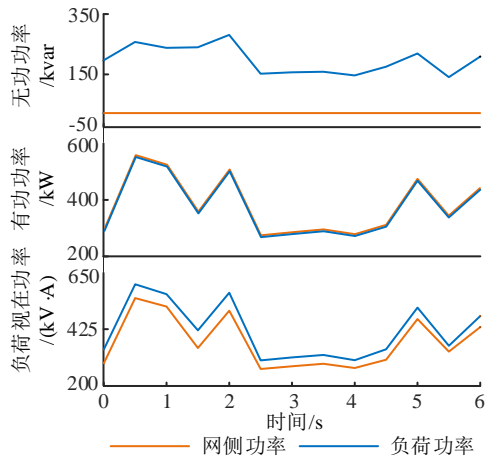


图 D2 降低线路损耗模式下网侧、负荷侧功率情况

Fig.D2 Power at the grid-side and load-side under the mode of reducing line losses

图 D3 为系统工作在提升经济效益模式，此时锂电池电量水平偏下，负荷侧未发生功率冲击问题，为了防止电池过放，限制其有功功率及无功功率输出。但同时考虑到经济收益，此时根据式(8)对无功功率进行补偿。

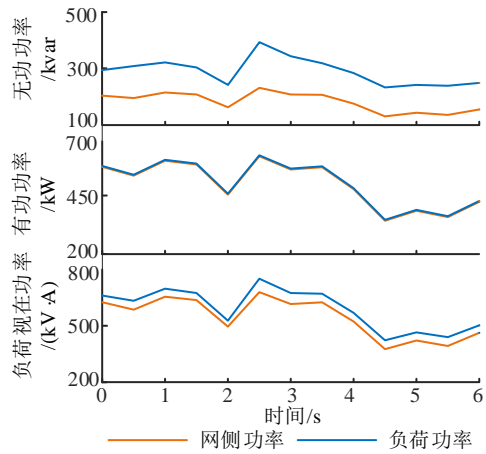


图 D3 提升经济收益模式下网侧、负荷侧功率情况

Fig.D3 Power at the grid-side and load-side under the mode of increasing economic returns

当锂电池电量以及降低到最低水平时，为了防止电池过放，降低电池使用寿命，从图 D4 看出，即使此时负荷水平较高（负荷侧视在功率超过 640kV·A），储能型电能调控装置有功功率输出为 0，同时降低无功功率补偿要求。

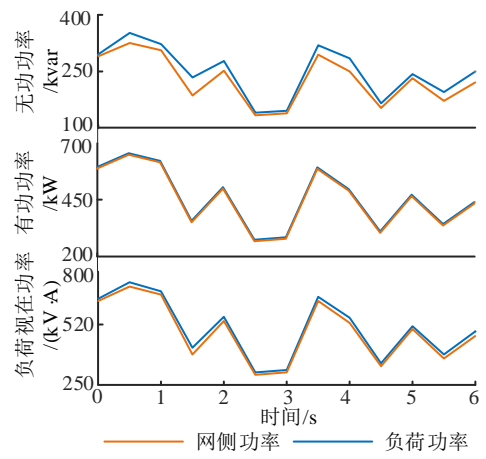


图 D4 延缓电池老化模式下网侧、负荷侧功率情况

Fig.D4 Power at the grid-side and load-side under the mode of delaying battery aging

图 D5 中，系统工作在充电限幅储能模式，此时负荷侧功率水平较低，当锂电池充电时，可以从图中看出网侧有功功率以及视在功率都要高于负荷侧。对于负荷侧无功功率，只有当配电网功率因数水平低于 0.9 时，才进行无功补偿。

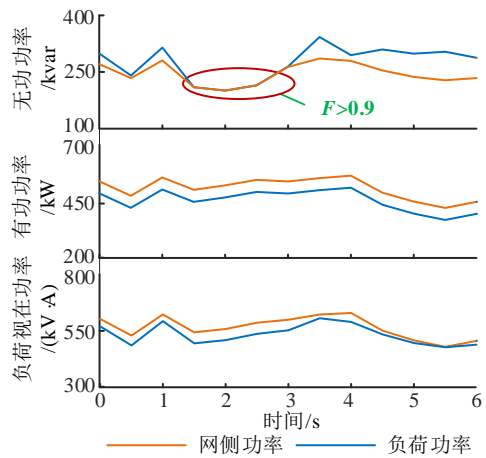


图 D5 充电限幅储能模式下网侧、负荷侧功率情况

Fig.D5 Power at the grid-side and load-side under the mode of charging and limited-amplitude storage