

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.03.013

考虑能量限制的全钒液流电池储能系统建模

刘心可^{1,2}, 李培强^{1,2}, 张忠凯^{1,2}, 曾靖杰^{1,2}

(1.福建工程学院 电子电气与物理学院,福建 福州 350118;
2.智能电网仿真分析与综合控制福建省高校工程研究中心,福建 福州 350118)

摘要: 本研究以全钒液流电池储能系统为研究对象,通过电力系统分析综合程序建立了包含能量限制模块的全钒液流电池储能系统模型。综合考虑了储能系统换流器的容量大小、荷电状态等因数,通过仿真分析对比两种控制策略以及模型在不同大小的储能电池中的适用性,验证了理论分析的准确性及模型的工程实用性。仿真结果表明,该模型既能通过限制无功功率传输保证传输的能量不超出换流器容量,又能根据实际有功功率大小调整无功功率上限,充分发挥储能系统的调节作用。

关键词: 电池储能系统;暂态稳定;限制环节;电力系统分析综合程序

中图分类号: TM464 文献标志码: A 文章编号: 1672-4348(2022)03-0281-07

Modeling of all-vanadium redox flow battery energy storage system considering energy limitation

LIU Xinke^{1,2}, LI Peiqiang^{1,2}, ZHANG Zhongkai^{1,2}, ZENG Jingjie^{1,2}

(1.School of Electric, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2.Smart Grid Simulation Analysis and Integrated Control Engineering Research Center of Colleges and Universities in Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

Abstract: With the all-vanadium redox flow battery energy storage system as the research object, a model of all-vanadium redox flow battery energy storage system with energy limiting module was established through the power system analysis software package. Considering the factors such as the capacity and state of charge of the converter in the energy storage system, the accuracy of theoretical analysis and the engineering practicability of the model were verified by comparing the two control strategies and the applicability of the model in different-sized energy storage batteries through simulation analysis. Simulation results show that the model can ensure that the energy transmitted by the energy storage system does not exceed the upper limit that the converter can bear by limiting the reactive power transmission, and the range of reactive power that the converter can transmit can be flexibly adjusted according to the actual active power, giving full play to the regulation function of the energy storage system.

Keywords: battery energy storage system; transient stability; restrictive link; power system analysis software package

电池储能技术在维持电网稳定方面优势明显,因而成为大规模储能技术的重要方案^[1,2]。随着电池成本的降低和集成技术的成熟,电池储能将在电力系统中更加普及。其中全钒液流电池

(all vanadium redox flow battery, VRB)充放电寿命长、使用安全、功率与容量灵活可变,在实际应用中越来越引起重视。为了得到实际工作中电池内部的数据指标,需要建立符合工程实际的电池

储能模型来保证仿真结果的准确性和可信度^[3]。

文献[4]对 VRB 的荷电状态(state of charge, SOC)等各个关键参数通过函数关系建模研究系统运行时各参数的变化过程。文献[5]建立了一个多时间尺度的能量储存模型,指出并网控制策略部分具有多时间尺度特征,对机电暂态和模型中长期动态都有影响。文献[6]以两种控制策略分别对储能进行了建模和仿真验证。有些学者使用电力系统分析综合程序(power system analysis software package, PSASP)进行储能系统建模的研究;文献[7]考虑了电力电子技术,在 PSASP 中搭建了并联储能型 FACTS 装置的暂态模型;文献[8]基于 PSASP 提出一种快速无振荡的复合策略建模;文献[9]基于 PSASP 进行了详细的储能系统机电暂态建模;文献[10]以扩展等面积法计算储能电池的最合适的工作时间长度。以上文献都考虑了无功功率限制,但没有具体建模,只是设定了无功输出的上下限,有关荷电状态(state of charge, SOC)的限制也没考虑换流器对功率的损耗。文献[11]虽然有无功功率限制环节建模,但没有研究限制环节对暂态稳定的影响。

本研究在 PSASP 中利用用户自定义(User-Defined, UD)建模功能建立了考虑储能能量限制的机电暂态模型,综合考虑了无功功率限制、SOC 限制等环节。

1 全钒液流储能电池系统模型

全钒液流储能系统在建模中可以分成由许多单独的电池经过串并联成的电池组,以及将电池与电网连接起来的并网换流器 PCS 控制系统。

1.1 全钒液流电池组

全钒液流电池组(VRB)由金属电极、含有不同电价的电解液、用于离子交换的离子隔膜、分别储存正负电解液的电解池等部分组成。在储能系统的充放电的过程中,由于循环泵的压力,两种电解液从各自的电解液池进入电池本体,被电池的离子膜隔开并在电极表面发生氧化还原,实现能量转换。

正极放电反应为:



负极放电反应为:



本研究使用的电池模型为改进的损耗假设等效模型^[12],具体如公式(3)。以受控电压源 U_{stack}

代表电池的开路电压, U_b 表示电池储能系统端口电压,通过储能系统内部电池的电流和系统端口的电流分别为 I 、 I_b 。根据电池内部损耗的属性,可以将电池的各种损耗分为 R_{Reac} 和 R_{Res} ,分别占内部总损耗的 60% 和 40%。泵损及附加损耗用 R_{fix} 表示,电极之间的电容用 C_{elec} 表示,电压为 U_{Celec} 。

$$\begin{cases} U_b = \left(C_{\text{elec}} \frac{dU_{\text{Celec}}}{dt} + I \right) R_{\text{Res}} + U_{\text{Celec}} \\ U_{\text{Celec}} = U_{\text{stack}} + IR_{\text{Reac}} \\ C_{\text{elec}} \frac{dU_{\text{Celec}}}{dt} = I_b - I - \frac{U_b}{R_{\text{fix}}} \end{cases} \quad (3)$$

储能电池单体的电动势可由 Nernst 方程表示为公式(4),因为单个电池的电能有限,不能满足整个系统的需要,需要将多个电池连续串并联来提高电池的规模。用 N_{cell} 表示 VRB 电池的数量,VRB 电池的开路电压可用公式(5)表示。

$$U_{\text{cell}} = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{V}^{3+}][\text{V}^{4+}]}{[\text{V}^{2+}][\text{V}^{5+}][\text{H}^+]} \quad (4)$$

$$U_{\text{stack}} = N_{\text{cell}} U_{\text{cell}} \quad (5)$$

式中, E_0 是电池在氧化和还原过程中正极电势 E_{0+} 与负极电势 E_{0-} 之间的标准电极电势,单位为 V; $[\text{V}^{i+}]$ ($i = 2, 3, 4, 5$) 表示各个价态钒离子的浓度, $[\text{H}^+]$ 表示氢离子浓度,一般为 1; 气体常数 R , 单位 J/(K · mol); T 为绝对温度; n 为电极反应中获得或失去的电子数,从 VRB 电池的工作原理中可以得到 $n = 1$; 法拉第常数 F , 单位 C/mol。

VRB 电池在绝对温度 T 为 298 K 时的标准电极电势 E_0 为:

$$E_0 = E_{0+} - E_{0-} = 1.259 \text{ V} \quad (6)$$

1.2 并网换流器 PCS 控制系统

换流器是储能系统运行的关键部分,它通过电力电子元件实现交直流双向变换,其四象限运行功能可以通过控制输出电压的幅度和相对于电网电压矢量的角度来改变换流器输出电流的大小及与电网电压的相位差;可根据电网的实际需求控制储能系统的有功和无功传输。

现实中的换流器最大容量一般比储能电池的最大有功输出大 0% ~ 10%^[13]。在储能系统建模中,需要对换流器的能量输出做出限制,本研究通过 PSASP 的 UD 建模功能对储能系统建模,在模型中设置换流器容量上限来限制储能系统能量的输出输入。

在电力系统中,有功功率会影响系统频率,有功功率过剩时系统频率升高;而无功功率的分布对电压的大小具有决定性作用。本研究的换流器采用功率外环电流内环双环解耦控制策略。其中,换流器的功率外环控制采用频率/有功控制,电压/无功控制,内环采用电流环控制。在暂态仿真过程中监测电网母线的角频率和电压的偏差值推导该母线的有功和无功缺额,通过换流器控制储能系统有功无功的出力调节电网的稳定性。

在储能电池工作的过程中,还需要监控电池的荷电状态 SOC。SOC 在数值上为电池剩余容量 E_{stack} 与额定容量 E_c 的比值,表达式为公式(7),取值范围为 0~1, SOC 降低到 0 意味着电池电量耗尽,当 SOC 上升到 1 时,意味着电量充满。

$$\text{SOC} = \frac{E_{\text{stack}}}{E_c} \quad (7)$$

在全钒液流电池系统中,在正负离子浓度的平衡状态下, SOC 是离子浓度的比值,其中,正极中:

$$\text{SOC} = \frac{[\text{VO}_2^+]}{[\text{VO}_2^+] + [\text{VO}^{2+}]} \quad (8)$$

负极中:

$$\text{SOC} = \frac{[\text{V}^{2+}]}{[\text{V}^{2+}] + [\text{V}^{3+}]} \quad (9)$$

假设正负极所用电解液浓度相同、两边的反应动力学相平衡,则 $\text{SOC} = \text{SOC}_{\text{正}} = \text{SOC}_{\text{负}}$ 。因此,在 $T = 298 \text{ K}$ 时,VRB 的单体开路电压公式(4)可以推导成公式(10)所示:

$$U_{\text{cell}} = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{1 - \text{SOC}}{\text{SOC} [\text{H}^+]} \right)^2 \quad (10)$$

其中, SOC 随着储能系统的工作过程变化,设某一时刻电池的荷电状态表示为 SOC_t , SOC_{t+1} 表示在单位时间后电池的荷电状态,即:

$$\begin{aligned} \text{SOC}_{t+1} &= \text{SOC}_t + \Delta \text{SOC} \\ \Delta \text{SOC} &= \frac{\Delta E}{E_c} = \frac{P_s \Delta t}{E_c} = \frac{I U_{\text{stack}} \Delta t}{E_c} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, Δt 表示单位时间; ΔSOC 表示荷电状态在单位时间内的变化量;令储能电池的容量为 E_c , P_s 和 I 表示电池的充放电功率和充放电电流。

实际上,电池运行有许多限制,物理特性和电池充电/放电状态应作为其能量限制条件。建立满足电气要求的机电暂态模型,需要在运行过程中忽略电池自身的动态变化特性对机电暂态模型的影响。设定充放电时 SOC 的上、下限值分别为

$\text{SOC}_{\text{max}}, \text{SOC}_{\text{min}}$, 储能电池的最大、最小输出功率 $P_{\text{max}}, P_{\text{min}}$ 不因 SDC 的变化而变化。

2 考虑能量限制的储能系统控制策略

2.1 储能功率限制环节设计

2.1.1 换流器的 SOC 限制环节

根据电力系统的规定,为保护电池,在储能系统工作的过程中需要测定荷电状态 SOC 的值,当 SOC 超过 $[\text{SOC}_{\text{min}}, \text{SOC}_{\text{max}}]$ 范围时,储能系统应该停止工作,限制环节控制有功功率输出为 0,使系统停止输出或输入有功功率。

以储能系统控制环节的输出值作为储能电池的输出功率,输出值为正,意味着系统放电;输出值为负,意味着系统吸收功率给电池充电。

根据电池的有功变化可以求得电池的荷电状态的变化值 ΔSOC ,进而计算出电池的实际 SOC 来限制电池的充放电深度,避免电池长期过充或过放损坏电池,从而延长储能系统的使用寿命,提高储能系统的工作效率。根据公式(11)和充放电效率公式(12),设计得到 SOC 限制环节流程图如图 1 所示。

$$\begin{cases} P_s = P \eta_{\text{充}} \\ P = P_s \eta_{\text{放}} \end{cases} \quad (12)$$

式中, P_s 是电池的充放电功率, P 是整个储能系统的充放电功率,换流器的充放电效率分别是 $\eta_{\text{充}}$ 和 $\eta_{\text{放}}$,无论充电放电,经过换流器都会有能量损耗。

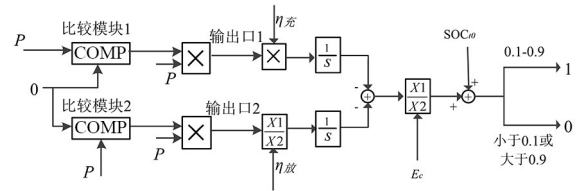


图 1 SOC 限制环节流程图

Fig.1 SOC limit link flow chart

图 1 中, $1/s$ 是积分功能框图; X_1/X_2 是除功能框图,输入端口 X_1 为分子,输入端口 X_2 为分母;判断正负可以利用 UD 模型中的比较模块 COMP,比较模块的具体含义是当输入端 1 口 > 输入端 2 口时输出为 1,否则输出为 0。

当输入 P 小于 0 时,第一个比较模块输出为 1,第二个比较模块输出为 0,再分别乘上 P ,则输出口 1 输出 P ,输出口 2 输出 0, P 大于 0 正好相反,

如此将正负区分开。当有功功率小于 0 时,对电池进行充电,使得 SOC 值增加,当有功功率大于 0 时,使电池放电,所以 SOC 值减小。当 SOC 在区间内输出 1,当 SOC 超出范围,输出 0。

2.1.2 换流器限制环节

受材料和技术限制,一个换流器所能承受的最大输出功率是有限的,所以换流器的实际容量必须根据情况设置其上限。

$$\begin{cases} -P_{\max} \leq P \leq P_{\max} \\ -Q_{\max} \leq Q \leq Q_{\max} \\ Q_{\max} = \sqrt{S^2 - P^2} \end{cases} \quad (13)$$

式中 P_{\max} 为储能系统充放电最大有功功率; Q_{\max} 为最大无功功率; P 为有功功率输出; Q 为无功功率输出; S 为换流器的容量,比储能电池最大有功功率大 0%~10%。

有功功率输出与储能系统自身有关,不需要计算,无功功率限制环节数学模型为:

$$|Q| \leq \sqrt{S^2 - P^2} \quad (14)$$

当 Q 大于 0 时,

$$0 \leq Q \leq \sqrt{S^2 - P^2} \quad (15)$$

$$0 \leq \frac{Q}{\sqrt{S^2 - P^2}} \leq 1 \quad (16)$$

$$0 \leq \frac{Q}{S \sqrt{1 - \frac{P^2}{S^2}}} \leq 1 \quad (17)$$

当 $\frac{Q}{S \sqrt{1 - \frac{P^2}{S^2}}} \geq 1$ 时,取 1。由以上公式设计

流程图如图 2。

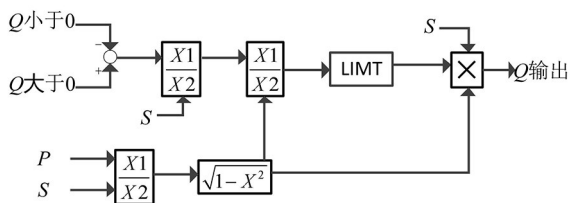


图 2 无功限制模块流程框图

Fig.2 Flow chart of reactive power limiting module

其中,框图 LIMIT 是限制功能,超出上限后输出上限值,当储能系统准备输出的无功功率 $Q < 0$ 时需要将 Q 乘以 -1 变为正数,经过限制后需要再变回负数,在此设定一个正负指示,当 $Q < 0$ 时

正负指示输出为 -1 ,将无功的值恢复成负值。最后将经过限制模块后的无功功率乘以正负指示,得到最终的无功输出。

2.2 储能控制环节设计

2.2.1 外环控制器设计

换流器外环的频率/有功控制,电压/无功控制,都可以采用典型 PI 控制器来实现。以角频率和母线电压的实际值与基准值做差,得到 ΔW 、 ΔU 作为输入信号经 PI 控制器分别得到有功指令 P_{set} 和无功指令 Q_{set} ,并且外环输出量传输到内环作为输入量,公式为:

$$\begin{cases} P_{\text{set}} = \left(K_{wp} + \frac{K_{wi}}{s} \right) \Delta w \\ Q_{\text{set}} = \left(K_{up} + \frac{K_{ui}}{s} \right) \Delta U \end{cases} \quad (18)$$

式中 K_{wp} 、 K_{vp} 分别为 PI 控制器比例控制的比例系数; $1/s$ 是拉式积分算子,作用是积分计算; K_{wi} 、 K_{vi} 分别为 PI 控制器积分控制的积分系数。

2.2.2 内环控制器设计

在得到外环传递的输出量后,将它作为控制策略的内环电流环的基准值,经过 PI 控制器生成电力电子开关的脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 信号传递给滤波器,再将有功、无功各自前馈解耦,产生 PWM 信号,详细过程见文献[14]。最后对换流器的并网电流进行控制,运用等效变换和零点相互抵消的原则,可以将内环控制近似等价于两个独立的一阶惯性环节,即:

$$\begin{cases} P = \frac{1}{1 + T_p s} P_{\text{set}} \\ Q = \frac{1}{1 + T_q s} Q_{\text{set}} \end{cases} \quad (19)$$

式中, T_p 、 T_q 为控制系统响应时间常数。 P 、 Q 为储能输出的有功无功。

3 基于 PSASP 的控制策略模型

PSASP 的用户自定义 UD 建模功能搭建的模型只能以节点电流作为输出量^[15],必须设计一个转换环节将储能系统输出的有功无功功率换算为电流源电流实部和虚部,以电流的形式来调节电网的频率和电压的波动。

设 $S = P + jQ$ 为储能系统在安装节点注入的视在功率,令 U_R 、 U_I 为并网点母线电压 U 的实、虚部, I_R 、 I_I 为注入电流 I 的实、虚部,则

$$S = UI^* = (U_R + jU_I) (I_R - jI_I) \quad (20)$$

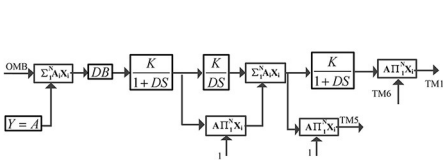
其中展开公式(20)得到 P 、 Q :

$$\begin{cases} P = U_R I_R + U_I I_I \\ Q = U_I I_R - U_R I_I \end{cases} \quad (21)$$

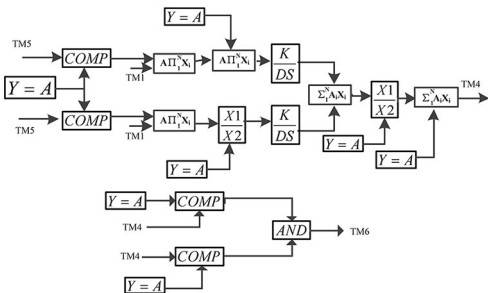
求解上述方程组,得

$$I_R = (U_R P + U_I Q) / (U_R^2 + U_I^2) \quad (22)$$

$$I_I = (U_I P - U_R Q) / (U_R^2 + U_I^2) \quad (23)$$



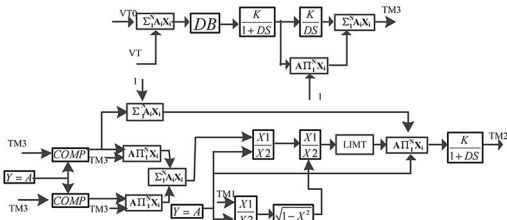
(a) 有功功率输出模块



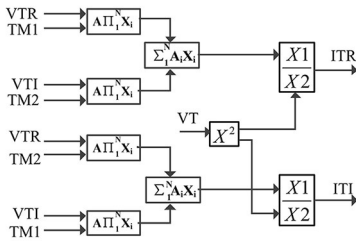
(c) SOC限制环节

根据式(22)~(23)可以搭建储能电池机电暂态仿真模型的接口部分。

储能系统的机电暂态模型显著降低了模型的仿真难度,基于第2节,本研究使用 PSASP7.0,利用其中的用户自定义 UD 建模功能,构建储能系统的机电暂态仿真模型,如图3所示。框图的具体含义参见文献[15],信号含义见表1。



(b) 无功功率输出模块



(d) UD模块模型接口部分

图 3 PSASP UD 模块储能系统模型

Fig.3 Energy storage system of PSASP UD module

表 1 UD 模型信号具体含义

Tab.1 Specific meanings of UD model's signal	
信号	物理量
TM1	内环有功输出 P
TM2	内环无功输出 Q
TM3	外环无功输出 Q_{set}
TM4	荷电量 SOC
TM5	外环有功输出 P_{set}
TM6	SOC 控制信号

4 算例仿真分析

根据搭建的储能系统机电暂态仿真模型,在 PSASP 仿真平台上进行了仿真试验,使用了该软件自带的 CEPRI-7 网络标准算例进行计算,仿真设置积分步长 0.01 s,仿真总时长 15.00 s,并验证了其有效性,网络的结构如图4所示。

将 S_1 作为平衡节点,选择系统中的常规潮流计算作为初始暂态值参与时域仿真,得到潮流计

算参数后进行短路测试。当仿真运行到 0.02 s 时,在母线 B_3 和母线 B_4 之间设置单回路 A 相接地短路故障;后在 $t = 0.15$ s 时由继电保护装置工作将短路部分断开;在 $t = 0.70$ s 时自动重合闸成功,监控电网母线电压与功角的变化。

4.1 不同无功限制策略的比较

将本控制策略与直接设置无功上限的控制策

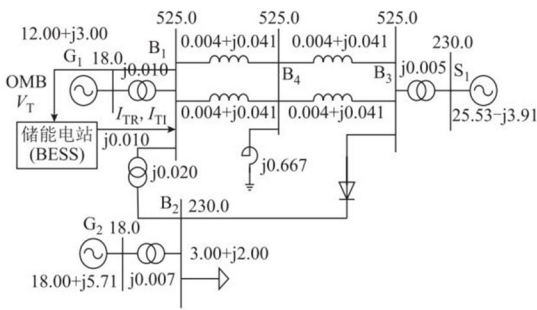
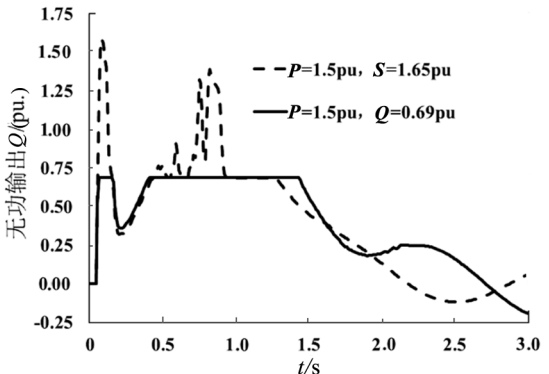


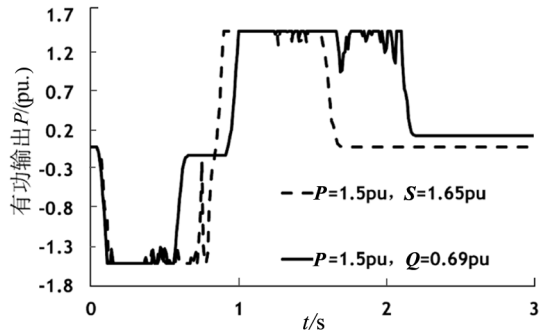
图 4 CEPRI-7 网架

Fig.4 CEPRI-7 grid

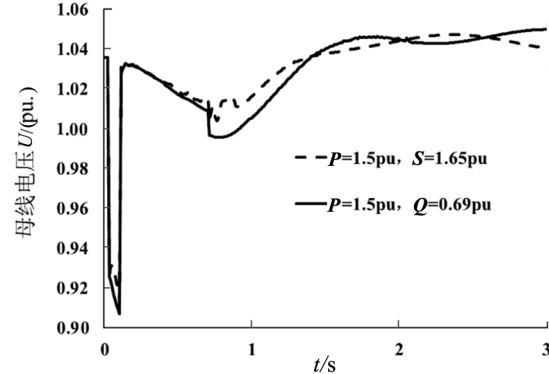
略对比。设置系统的基准容量 $S_B = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $P = 1.5 \text{ pu}$ (pu 表示标么值), 死区设置 0.01, 将储能系统接在 B1 母线处, 设置无功限制环节换流器容量比储能电池有功输出大 10%, 所以 $S = 1.65 \text{ pu}$ 。如果是直接设置无功上限, 由于 $P = 1.50 \text{ pu}$, $S = 1.65 \text{ pu}$, 当有功输出达到上限时, Q 极限值为 0.69 pu 。此时储能的有功无功输出曲线和母线电压曲线输出的前 3 s 如图 5 所示。



(a) 不同无功限制方法的储能无功输出



(b) 不同无功限制方法的储能有功输出



(c) 母线电压

图 5 不同无功限制方法的储能有功
无功输出与母线电压变化

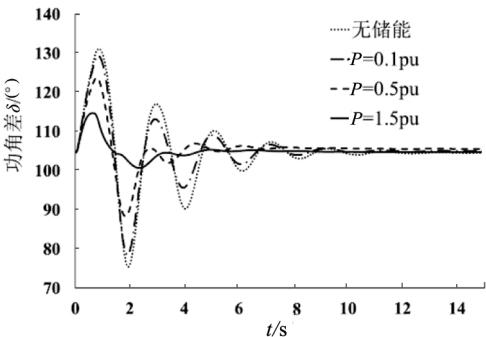
Fig.5 Energy storage's active and reactive power
output and bus voltage change with different
reactive power limiting methods

由图 5(a)、5(b)可见, 由于有功输出不是一直保持在极限值, 所以本控制策略在有功未达到极限时无功功率的极限值将大于 0.69 pu 。如图 5(c)所示, 本控制策略在电压跌落初期时更加抑制母线电压的跌落幅度, 之后电压的震荡幅度也要小。所以使用本控制策略的无功功率的极限值将会是一个随着有功输出变化的变化量, 在调节电网稳定方面会更加灵活。

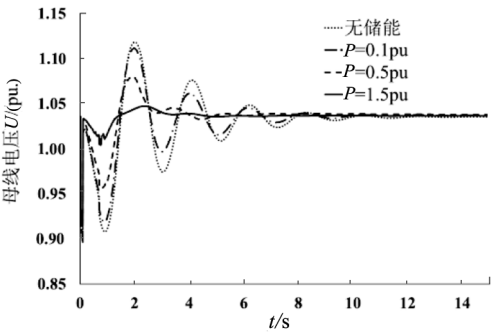
4.2 限制环节在不同大小的储能模型中的适用性

不同大小的储能电池有着不同的最大有功功率输出, 需要配备不同容量的换流器。为了验证控制策略的适用性, 将在 B_1 母线处, 接入最大有功功率输出不同的储能系统并配备相应容量的换流器, 令储能系统充放电的最大有功功率分别为 0.1 、 0.5 、 1.5 pu ; 设置换流器容量 S 分别对应为: 0.11 、 0.55 、 1.65 pu ; 初始荷电量 $\text{SOC}_{i0} = 0.5$, 死区设置 0.01。仿真计算出储能电池在不同最大工作功率下, 发电机功角、母线电压还有储能系统充放电有功功率变化曲线如图 6 所示。

由图 6 各个曲线可以看出系统故障后的震荡幅度都随着储能系统的充放电功率的增大而减小, 并随着时间做减幅震荡, 可知系统发生故障后储能系统能够很快响应, 平复系统的波动, 说明所建立的能量限制模块具有良好的实用性, 适用于不同规模的储能系统。



(a) 发电机功角 G1-S1



(b) 母线 B1 电压

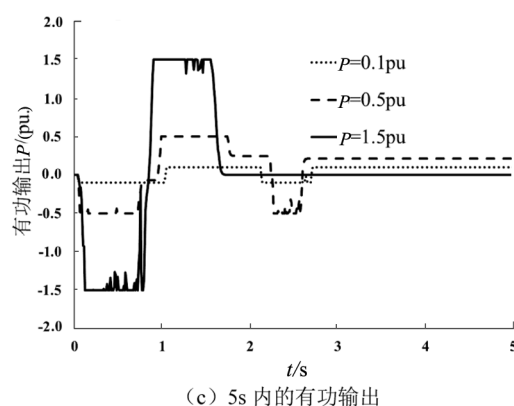


图6 不同储能不同工作功率下的发电机功角、
母线电压和有功输出

Fig.6 Generator power angle, bus voltage
and active output under different
energy storage and working power

5 结语

本研究基于 PSASP 建立拥有限制环节的全钒液流电池储能系统建模并进行仿真分析,并通过 CEPRI-7 算例来验证该模型的工程实用性。现实中的储能设备由于材料、温度等物理限制,不可能无限大的输出或输入能量,在模型的建立中必须考虑它的换流器容量限制,设置能量限制环节来限制功率传输。仿真结果中的电压幅值以及母线频率说明该模型既能通过限制储能系统的无功输出与输入,防止储能系统的功率传输超过换流器能够承受的极限,又能根据储能系统的实际有功功率及时调整无功输出功率的上下限,充分发挥储能系统对电力系统的调节稳定作用。不同大小的储能电池配备不同容量的换流器,可以有效调节储能电池的无功输出。

参考文献:

- [1] 孙玉树, 杨敏, 师长立, 等. 储能的应用现状和发展趋势分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 80-89.
- [2] 苏烨, 石剑涛, 张江丰, 等. 考虑调频的储能规划与竞价策略综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 191-198.
- [3] 刘璐, 牛萌, 郑伟杰, 等. 考虑内部参数不一致性的储能系统用锂电池组建模[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 15-23.
- [4] 葛维春, 孙恺, 葛延峰, 等. 计及大规模全钒液流电池储能系统外特性建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 171-179.
- [5] 叶小晖, 刘涛, 吴国暘, 等. 电池储能系统的多时间尺度仿真建模研究及大规模并网特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2635-2644.
- [6] 葛延峰, 何俊峰, 葛维春, 等. 全钒液流电池储能系统的仿真研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(3): 21-29.
- [7] 张步涵, 马智泉, 谢光龙, 等. 并联储能型 FACTS 装置的 PSASP 建模与仿真[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 31-36.
- [8] 张博越, 刘宗歧, 李建林. 基于复合控制策略的并网光伏电站机电暂态仿真模型研究[J]. 电器与能效管理技术, 2016(16): 66-71.
- [9] 李建林, 牛萌, 张博越, 等. 电池储能系统机电暂态仿真模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1911-1918.
- [10] 孙培栋, 李培强, 曹鹏程, 等. 基于扩展等面积定则的储能电站提高电网暂态稳定最优工作时间的研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 3996-4008.
- [11] 曹鹏程, 李培强, 孙培栋, 等. 电池储能提高电网薄弱节点电压稳定性的研究[J]. 电气传动, 2021, 51(24): 67-74.
- [12] 李培强, 亓学忠, 屈星, 等. 考虑含全钒液流电池储能系统的广义综合负荷模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(8): 107-118.
- [13] 蔡永翔, 唐巍, 张璐, 等. 基于光伏逆变器无功调节的低压配电网多模式电压控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 133-141.
- [14] 陈嘉楠. 多台储能系统接入电网及控制方法的仿真建模研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [15] 中国电力科学研究院. 电力系统分析综合程序(PSASP)用户手册[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2002.

(责任编辑: 方素华)