

DOI: 10.7667/PSPC151153

含新能源直流电网的状态反馈控制

刘先正¹, 王兴成¹, 温家良², 李金元², 张强¹

(1. 大连海事大学, 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026; 2. 国网智能电网研究院, 北京 102211)

摘要: 为适应直流电网智能、高效、经济地运行, 实现网络中不同分布式电源、客户端的协同运行, 基于六端树状直流电网物理仿真平台需求提出了一种适用于含新能源并网的电网系统级控制策略。将该六端电网视为一个多输入多输出的系统, 利用键图方法提取出网架的状态空间方程, 分析该系统的动态特性后确定闭环极点配置的优化目标, 并提出用线性系统综合的方法设计了状态反馈控制器。最后, 在 Matlab/Simulink 仿真平台中搭建了该模型, 并与传统主从裕度控制方法做了仿真对比。结果显示所提状态反馈控制器对新能源带来的电压波动具有明显抑制效果。

关键词: 直流电网; 键图法; 状态反馈控制; 主从裕度控制

State feedback control of DC grid with renewable energy

LIU Xianzheng¹, WANG Xingcheng¹, WEN Jialiang², LI Jinyuan², ZHANG Qiang¹

(1. Institute of Information Science Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
2. State Grid Smart Grid Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: In order to adapt to the intelligent, efficient, economic operation of DC grid, to realize cooperation of different distributed power supply and load, based on demand of six terminal tree DC grid physical simulation platform, a system level coordinated control strategy suitable for renewable connected grid is proposed. The six terminal grid is regarded as a multi input multi output system, bond graph method is utilized to extract state space equation of the grid, after analyzing the dynamic characteristics of the system, the optimal target of closed-loop poles placement is determined, and linear system integration method is proposed to design the state feedback controller. Finally, the model in Matlab/Simulink platform is built, compared with traditional master-slave margin controller, simulation result of the proposed state feedback controller has obvious inhibitory effect on voltage fluctuation brought by renewable energy.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB215204).

Key words: DC grid; bond graph method; state feedback control; master-slave margin control

0 引言

基于电压源换流器的多端直流输电技术近年来在我国得到了迅猛发展, 2013 年底广东南澳±160 kV 三端柔直输电示范工程投运, 2014 年中浙江舟山五端柔直输电工程投运, 2015 年初世界首台 200 kV 高压直流断路器完成型式试验更为多端直流输电扫清了技术障碍。VSC-MTDC 在远距离输电建设成本上具有优势, 且兼具独立控制有功、无功, 潮流反转及稳定直流母线电压的运行特性, 是解决高风电渗透率的有效措施^[1-3], 因而随着越来越多具有间歇性、

随机性特点的可再生能源接入电网, 直流电网的概念成为研究热点^[4-6]。

国际大电网会议 CIGRE “HVDC Grid Feasibility Study” 工作组报告中给出直流电网的定义是: 换流器端互联所构成的网格化结构电网^[7]。文献[8]则从直流电网运行特点的角度给出了更为详细的描述: 是一个具有先进能源管理系统的智能、稳定的交直流混合广域传输网络, 网络中不同的客户端、输电网络、微电网和电源都可以得到有效地管理、优化、监控、控制和对任何电力问题进行及时的响应, 并能整合多个电源, 以最小损耗和最大效率对电能进行传输和分配。

不同于交流电网, 直流电网不存在功角稳定及频率稳定性, 其电压稳定性即表征网络的有功功率

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (973 项目) (2012CB215204)

平衡。为实现网络中各端能量的平衡, MTDC 中传统协调控制方法包括单松弛节点的定电压控制、电压下垂控制^[9-10], 以及多点的主从裕度控制^[11]及多点电压下垂控制^[12]等。这些方法源于交流电网的传统调频方法, 控制逻辑简单, 对通信要求低, 且无需多端网络的精确模型, 是一类比较可靠的供电方式^[13-14]。然而这种开环控制逻辑有很多不足, 如电压是有差稳定, 动态性能欠佳、负荷经济分配能力低, 与以上所描述的直流电网特性的描述还有很大距离。为克服以上缺陷, 本文尝试对基于通信的多端协调控制算法进行探讨, 即假定各端状态对于中央控制器而言是即时可知的, 将直流电网视为一个多输入多输出的系统, 利用键图方法提取出网络的状态空间方程, 并在此基础上利用系统综合的方法设计了状态反馈控制器, 重新配置了系统闭环极点分布, 改善了系统动态性能。为验证控制器性能, 与传统电压下垂控制方法进行了仿真对比。

1 六端直流电网建模及分析

1.1 直流电网物理仿真平台

一个包含交流并网(Sf₁端)、电池储能(Sf₂端)、光伏发电(Sf₃端)、交流负载(Sf₄端)、风力发电(Sf₅端)以及直流负载(Sf₆端)的六端树状网络被用以等效模拟大型直流电网, 各端电源、负荷以 AC/DC 或 DC/DC 变换器与直流电网连接, 因而各端均可自由地稳定其设备侧电压。系统网架结构如图 1 所示。

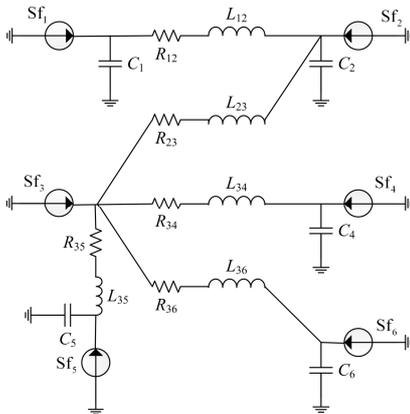


图 1 六端树状直流电网结构图

Fig. 1 Structure diagram of six terminal tree topology DC grid

图中 C 为各端支撑电容, R、L 分别为线路等效电阻和电抗, 下标的数字代表各变量对应的端口号。为监视各端换流站、线路的运行状态, 并实现系统级协调控制对各端发送功率、电压等控制指令, 平台采用工控机作为中心控制器, 并利用光纤与各

端换流站进行通信。该监控系统结构如图 2 所示。

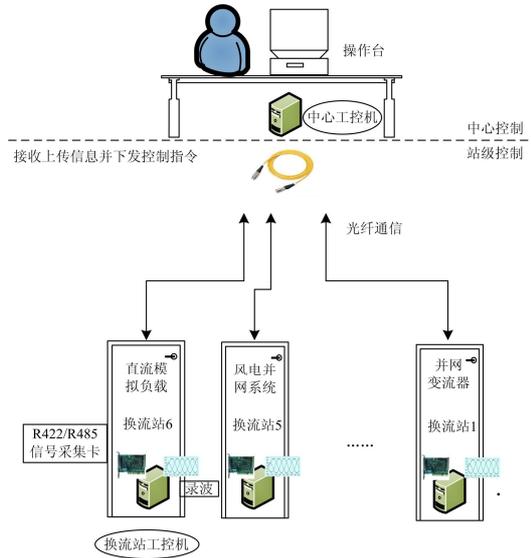


图 2 物理仿真平台监控系统

Fig. 2 Monitoring and control system of physical simulation platform

1.2 键图法建模

键图是一种通过能量的存储、转移和耗散来描述动力系统的一种系统模型化方法。在电路拓扑的键图表示中, 线路阻抗被划归为耗能元件, 电感电容被归为储能元件, 电压源和电流源为供能元件(能流源、能力源), 变压器为交换能元件, 线路的串并联连接方式则归为传输能元件, 元件之间的连接关系不是信号流, 而是能量流, 这对于多种能量耦合的系统提供了手段。利用键图法对该网络进行了等效建模, 其详细建模推理过程见文献[14], 本文仅给出简要建模过程及结果。图 1 所示电网可等效为图 3 所示键图。

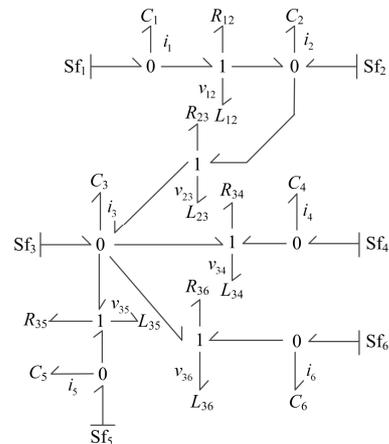


图 3 树状六端网络的键图表示

Fig. 3 Bond graph of six terminal DC grid

键图中 0 键表示与其连接的元件为并联关系, 1 键表示与其连接的元件为串联关系, 图中 v 、 i 则表示电压、电流。则可根据键图中串并联关系进行如下推导:

$$i_1 = Sf_1 - i_{12} = Sf_1 - \int v_{12} / L_{12} \quad (1)$$

$$v_{12} = v_1 - v_2 - i_{12} \cdot R_{12} = \int i_1 / C_1 - \int i_2 / C_1 - \int v_{12} \cdot R_{12} / L_{12}$$

以此类推, 键图中所包含 11 个储能元件, 则可列写 11 个等式的方程组如式(2)。

$$i_1 = -\int v_{12} / L_{12} + Sf_1$$

$$i_2 = \int v_{12} / L_{12} - \int v_{12} / L_{12} - \int v_{23} / L_{23} + Sf_2$$

$$i_3 = \int v_{23} / L_{23} - \int v_{34} / L_{34} - \int v_{35} / L_{35} - \int v_{36} / L_{36} + Sf_3$$

$$i_4 = -\int v_{34} / L_{34} + Sf_4$$

$$i_5 = -\int v_{35} / L_{35} + Sf_5$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/L_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/L_{12} & -1/L_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/L_{23} & -1/L_{34} & -1/L_{35} & -1/L_{36} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/L_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/L_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/L_{36} \\ 1/C_1 & -1/C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{12}/L_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{23}/L_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/C_3 & -1/C_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{34}/L_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/C_3 & 0 & -1/C_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{35}/L_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 1/C_3 & 0 & 0 & -1/C_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{36}/L_{36} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 10 \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \vdots \\ \vdots & 1 & \vdots \\ & & 1 \\ 0 & \cdots & 0 & 10 \\ & & & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据所需要的控制目标可构建相应输出方程组, 如控制各个端电压的稳定性可构建如式(4)。

$$Y = \begin{bmatrix} 1/C_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1/C_2 & & \\ \vdots & & 1/C_3 & \\ 0 & & & 1/C_4 \\ & & & & 1/C_5 \\ & & & & & 1/C_6 \end{bmatrix} X \quad (4)$$

1.3 模型分析

由于本文所设计系统级控制器带宽在低频范围, 因而不妨忽略支撑电容、电缆电抗对高频的非线性特征, 假定系统 $\{A, B\}$ 是一个多输入多输出的线性定常系统。其能控性矩阵 Q_c 为 11×66 矩阵。

$$Q_c = [B \ AB \ \cdots \ A^{n-1}B] \quad (5)$$

计算得到该能控性矩阵的秩为 11, 可知系统状态完全能控。

利用 Matlab 对该状态空间方程进行闭环零极点提取, 可见图 4。

系统闭环极点均位于 s 左半平面, 说明系统自身是稳定的, 但有 5 对复数极点, 因而其时间响应是振荡的, 其中有两对极点位置重复。闭环系统存

$$\begin{aligned} i_6 &= -\int v_{36} / L_{36} + Sf_6 \\ v_{12} &= \int i_1 / C_1 - \int i_2 / C_2 - \int v_{12} \cdot R_{12} / L_{12} \\ v_{23} &= \int i_2 / C_2 - \int i_3 / C_3 - \int v_{23} \cdot R_{23} / L_{23} \\ v_{34} &= \int i_3 / C_3 - \int i_4 / C_4 - \int v_{34} \cdot R_{34} / L_{34} \\ v_{35} &= \int i_3 / C_3 - \int i_5 / C_5 - \int v_{35} \cdot R_{35} / L_{35} \\ v_{36} &= \int i_3 / C_3 - \int i_6 / C_6 - \int v_{36} \cdot R_{36} / L_{36} \end{aligned} \quad (2)$$

选取上述方程组中电容的电流积分以及电感的电压积分作为状态变量 X , 而电流、电压为状态微分量 \dot{X} , $[Sf_1, Sf_2, \cdots, Sf_6]$ 为输入量 u , 则可将方程组转换为微分方程组, 构成状态空间方程。经整理得到状态方程 A 、 B 矩阵分别为 11×11 以及 11×6 维矩阵。

在一个十分接近于坐标零点的极点, 附近又没有闭环零点, 成为该系统的主导极点, 将对系统的调节时间起很大负面影响。

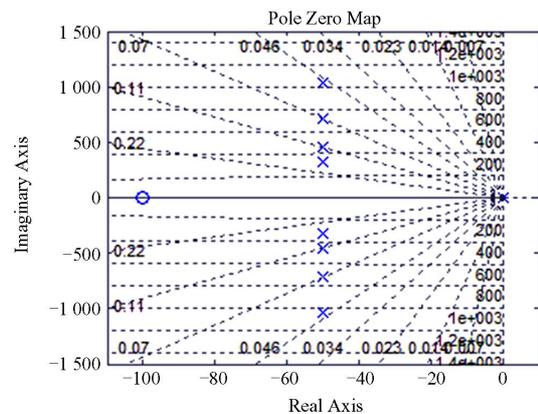


图 4 直流电网系统零极点分布

Fig. 4 Zero-pole point distribution of DC grid system

2 状态反馈控制器设计

2.1 状态反馈控制原理简述

状态反馈是以系统的状态量为反馈量的一种反

馈控制形式,是现代控制理论中最为基本的控制形式^[14]。考虑被控对象 $\{A, B, C\}$ 为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (6)$$

式中: x 为 n 维状态向量; u 为 p 维输入向量; A 为 $n \times n$ 维系统矩阵; B 为 $n \times p$ 维输入矩阵; C 为 $q \times n$ 维输出矩阵。取 $p \times n$ 维状态反馈矩阵,它将状态向量 x 负反馈至输入向量 u 处。其结构图如图5所示。

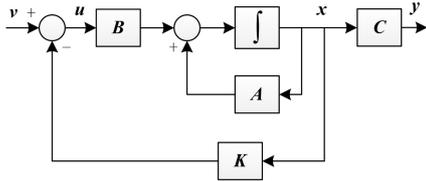


图5 状态反馈控制系统的结构

Fig. 5 Structure of state feedback control system

则系统控制量为

$$u = -Kx + v \quad (7)$$

将该式代入式(6),则采用状态反馈控制后的闭环系统状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{x} = (A - BK)x + Bv \\ y = Cx \end{cases} \quad (8)$$

系统矩阵由开环的 A 变为 $(A - BK)$,即通过反馈矩阵 K 的选取可以重构系统的极点分布。

2.2 多输入系统化为单输入系统

通过上一节模型分析可知,从六端树状直流电网建立的等效系统状态完全能控,而所选取的状态变量均是容易计算得到的,因而适合采用系统综合的方法来解决。根据极点配置定理可知,被控系统 $\{A, B, C\}$ 完全能控,因而其全部 n 个极点可通过状态反馈控制的方法任意配置。但由于是多输入多输出系统,并不能像单输入系统那样采用艾克曼公式直接进行计算。

通常,MIMO系统极点配置主要由三种手段^[15-16]:

- (1) 化为单输入系统进行极点配置;
- (2) 化为旺纳姆/龙伯格规范型的极点配置方法;
- (3) 鲁棒特征结构配置的极点配置方法。

由于化为单输入系统的步骤在 Matlab 中便于实现,因而采用该方法进行控制器设计。由上节分析可知, A 矩阵具有重特征值,因而 A 阵并非循环矩阵,需先选取一个 6×11 维反馈矩阵 K_1 ,使 $A - BK_1$ 为循环矩阵。 K_1 的选择方法可由式(9)得到。

$$K_1 = -W\tilde{Q}_c^{-1} \quad (9)$$

其中 \tilde{Q}_c 为在能控矩阵 Q_c 所对应的格栅图中行

向搜索,所选取出的11个线性无关列向量所组成的 11×11 维矩阵。即从格栅图最左上格(对应 $A^0 b_1$)开始,逐行从左往右搜索,如对应列 $A^j b_j$ 与前各列向量均线性无关,即可列入至 \tilde{Q}_c 中,一行找完从下一行继续寻找。记该11个列向量对应格栅图中最大列数为 r ,并记第 j 列线性无关列向量数为 v_j ,则有 $v_1 + v_2 + \dots + v_r = 11$,在本案例中 r 为6,则 $v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = v_5 = 2$,而 $v_6 = 1$,即所选取 \tilde{Q}_c 为

$$\tilde{Q}_c = [b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, Ab_1, Ab_2, Ab_3, Ab_4, Ab_5] \quad (10)$$

其中, b_j 表示 B 阵中第 j 列向量。式(9)中 W 为一个 6×11 矩阵,可由如下定义:

$$W = [0, e_2, \dots, 0, \dots, e_{v_r}, 0] \quad (11)$$

其中 e_i 表示第 i 个元素为1其余元素全为0的列向量,该 e_i 向量分别位于 W 中第 v_1 列、...、第 $\sum_{k=1}^{v_r-1} v_k$ 列,本例中即为2、4、6、8、10列。由此可求得反馈矩阵 K_1 。令

$$\bar{A} = A - BK_1 \quad (12)$$

则较易验证 \bar{A} 具有11个不重复特征值,即为循环矩阵。同时选取

$$b = Be_1 \quad (13)$$

可使系统 $\{A - BK_1, b\}$ 是完全可控的,即将多输入系统极点配置问题转换为单输入系统的问题。

2.3 状态反馈控制器设计

由上节模型零极点分析可知,接近坐标零点的主导极点会造成系统调节过慢,因而希望将该极点左移到 $(-1, 0)$ 点,可写出该期望系统的特征多项式。

$$\varphi^*(s) = \prod_{i=1}^{11} (s - \lambda_i^*) = s^{11} + a_{10}^* s^{10} + \dots + a_1^* s + a_0^* \quad (14)$$

同时计算出原系统的特征多项式系数 a_{10}, a_9, \dots, a_0 ,则可确定一组反馈增益矩阵 K_2 为

$$K_2 = [a_0^* - a_0 : a_1^* - a_1 : \dots : a_{10}^* - a_{10}] P^{-1} \quad (15)$$

式中, P 矩阵是单输入系统转换为能控规范型的变换矩阵,可由式(16)得出。

$$P = Q \cdot \begin{bmatrix} a_{10} & a_9 & \dots & a_1 & 1 \\ a_9 & a_8 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ a_1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, Q 阵是系统 $\{A - BK_1, b\}$ 的能控性矩阵。该运算得到的 K_2 矩阵为 1×11 维,因而需要扩展成 11×11 维后与 K_1 矩阵相加,可得 $\{A, B\}$ 多输入系统的状态反馈矩阵解为

$$K = K_1 + e_1 K_2 \quad (17)$$

从以上过程不难看出, \mathbf{K} 阵中有 $r \times n$ 个元素待定, 要实现闭环特征多项式 n 个系数的调整, 可以有多种解, 因而其选择并不唯一。一般来说, 元素取值更小的 \mathbf{K} 阵更具有工程意义。

3 仿真算例

为比较所设计状态反馈控制器在动态响应上的效果, 在 Matlab/Simulink 中搭建了该六端树状直流电网模型, 并不失一般性引用文献[17]所述常规方法设计了控制器: 新能源并网电源端与负载端均由电流源等效, 通过加入指定信号或导入实际功率曲线数据来模拟输入, 交流并网端与储能端则采用主从电压裕度控制方式进行稳压控制, 其中储能端电压设定值更高, 意为当交流电网端超出容量时才启用储存容量。为降低其他控制环节带来的影响, 交流并网端 AC/DC 与储能端 DC/DC 站级以下控制均相同, 上层功率环控制器采用 PI 算法, 并调节其参数到较优值。

模型的一些基本参数如表 1 所示。

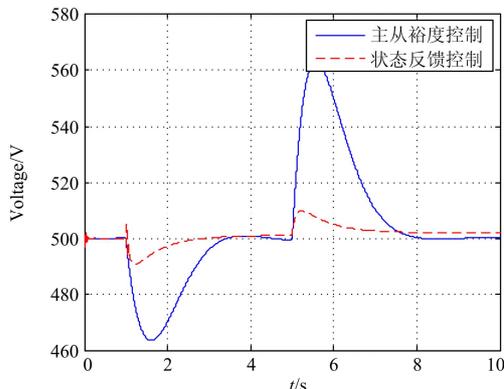
表 1 算例基本参数

Table 1 Main parameters of the model

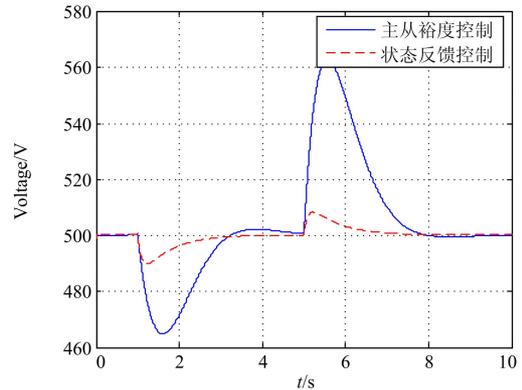
	规格参数
并网端容量	10 kVA
储能端容量	5 kW
风电装机容量	5 kW
支撑电容/端	2 300 μF
线路等效阻抗	0.2 Ω , 2 mH

3.1 阶跃响应

单位阶跃响应是对比系统动态性能的最直观方法, 设置初始状态使仿真从稳态开始, 1 s 时交流负载 Sf_4 端投入 1 kW 负载, 5 s 时光伏发电端(Sf_3 端)投入 2 kW 有功输出, 其动态响应过程如图 6 所示。



(a) 交流并网 Sf_1 端电压曲线



(b) 交流负载 Sf_4 端电压曲线

图 6 阶跃响应电压变化曲线

Fig. 6 Voltage curve of step response

仿真结果显示, 基于状态反馈控制器的六端直流系统具有更为显著的稳定性, 超调量从约 7% 降低到 2%, 调节时间也从约 2.5 s 减少至 1.5 s。该显著的动态性能改善物理意义不难理解: 传统的定电压控制实质是通过潮流变化来传递信息, 当换流站检测到本地电压偏离设定值时再通过反馈控制进行调节, 但显然某远端负载功率、电流发生变化时, 该信息在如此大容量支撑电容的作用下需要很长时间才能传递至控制器端, 即电压滞后电流变化约 90° 相位。而基于状态反馈控制的系统则直接根据状态的变化进行了更快的调节。两种控制下的交流并网 Sf_1 端输出电流如图 7 所示。

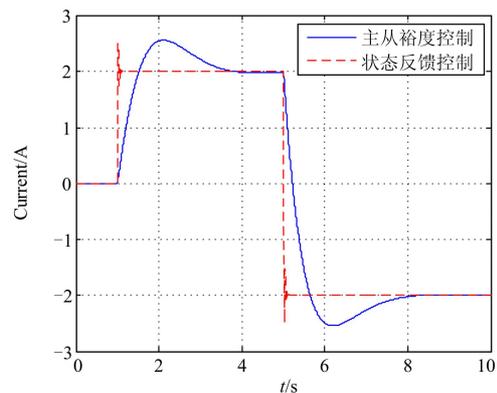


图 7 交流并网 Sf_1 端电流曲线

Fig. 7 Current curve of Sf_1 terminal

由图可见, 相比传统定电压的控制方法, 状态反馈控制器响应更快, 交流并网端换流器会沿着电流斜率限制最大限度地投入到调节电压波动中来。

3.2 连续变化仿真

将现场记录的风电输出功率曲线进行了等值换算, 输入到模型中以评估控制器对连续有功波动的响应能力, 得到图 8 所示仿真结果。

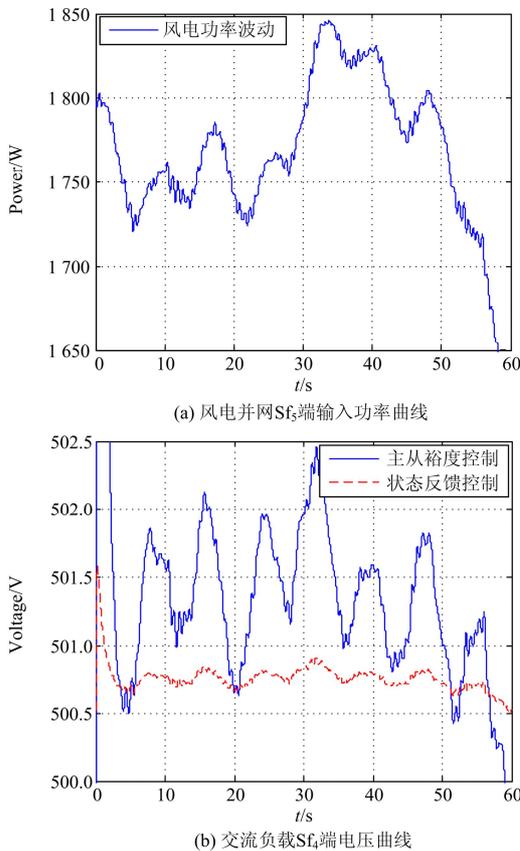


图 8 连续变化响应曲线

Fig. 8 Continuous change response curve

如图所示状态反馈控制器对于风电功率造成的电压波动具有相当强大的抑制效果。由此可见基于通信的状态反馈控制方法相比传统主从电压裕度控制，要更加快速、准确。然而信号传递通常会存在延时，本文在该反馈控制器到各个端控制器功率闭环之间增加纯滞后环节，发现当纯滞后时间大于约 10 ms 左右临界值时会使得系统变得不稳定。但由于该临界值与仿真步长等设置参数有关，因而暂时还无法分析其准确原因。

4 结语

本文尝试将一个六端树状直流电网视为一个多输入多输出的系统，基于键图方法提取出直流电网网架的状态空间方程，并在对系统模型进行分析后选择采用系统综合的方法设计了状态反馈控制器。最后在 Matlab/Simulink 中建立该六端直流电网模型，通过阶跃响应和连续变化仿真实验，对比了所提方法与传统主从电压裕度方法的控制性能。结果显示基于状态反馈控制的系统具有更快速的响应特性。

本文提出的状态反馈控制方法仍在以下几点有待完善：

(1) 系统综合的方法是在被控对象精确数学模型的基础上进行的，但建模过程不可避免的简化处理或环境变化引起模型的参数摄动会使被控对象模型与实际系统存在一定的差别，按此模型设计的控制器有可能达不到预期的控制性能指标，严重的甚至会导致系统不能正常运行。本文中提到的通信延时导致系统发散即是例子，后续还应通过控制系统鲁棒性分析及设计来解决。

(2) 所述基于详细模型的控制器设计方法更适用于端口数有限、网架结构固定不变化的应用场合，因而认为在当前示范运行的三端、五端直流输电工程及未来群岛供电、海上风电并网领域有直接意义。但在端口更多的场合，状态方程维数将大幅提升，控制器设计将会变得繁琐，因而期待会有更为成熟的解决方案应用于工程之中。

参考文献

[1] 徐殿国, 刘瑜超, 武健. 多端直流输电系统控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 1-12.
XU Dianguo, LIU Yuchao, WU Jian. Review on control strategies of multi-terminal direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 1-12.

[2] 李响, 韩民晓, 许东. 直流串并联海上风电机组控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 46-52.
LI Xiang, HAN Minxiao, XU Dong. Control strategy of DC parallel-series offshore wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 46-52.

[3] LIANG J, JING T J, GOMISBELLMUN O, et al. Operation and control of multiterminal HVDC transmission for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2596-2604.

[4] 滕松, 宋新立, 李广凯, 等. 模块化多电平换流器型高压直流输电综述[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(8): 43-50.
TENG Song, SONG Xinli, LI Guangkai, et al. A survey on HVDC transmission with modular multilevel converters[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(4): 43-50.

[5] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.

- [6] 黄晟, 王辉, 廖武, 等. 基于 VSC-HVDC 串并联拓扑结构风电场协调控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 155-162.
HUANG Sheng, WANG Hui, LIAO Wu, et al. The coordinated control strategy based on VSC-HVDC series-parallel topology in wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 155-162.
- [7] CIGRE B4-52 Working Group. HVDC grid feasibility study[R]. Melbourne: International Council on Large Electric System, 2011.
- [8] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [9] 于亚男, 金阳忻, 江全元, 等. 基于 RT-LAB 的柔性直流配电网建模与仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 125-130.
YU Yanan, JIN Yangxin, JIANG Quanyuan, et al. RT-LAB based modeling and simulation analysis of flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 125-130.
- [10] 张群, 赵倩, 陈朋. 基于 RT-LAB 的柔性直流输电系统仿真平台设计[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 123-128.
ZHANG Qun, ZHAO Qian, CHEN Peng. Design of real time simulation platform based on RT-LAB for flexible HVDC system[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 123-128.
- [11] HAILESELASSIE T M, UHLEN K. Impact of DC linevoltage drops on power flow of MTDC using droop control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1441-1449.
- [12] 杨煜, 孙大卫, 谢小荣, 等. 模块化多电平换流器型柔性直流系统的等效仿真方法比较[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 43-48.
YANG Yu, SUN Dawei, XIE Xiaorong, et al. Comparative study on the accelerated models of MMC-based VSC-HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 43-48.
- [13] 廖武, 黄守道, 黄晟, 等. 基于模块化多电平换流器的直流输电系统网侧不平衡故障穿越研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 197-203.
LIAO Wu, HUANG Shoudao, HUANG Sheng, et al. Unbalanced grid fault ride-through control method of HVDC power transmission based on modular multilevel converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 197-203.
- [14] 刘先正, 王兴成, 温家良, 等. 基于键图法的直流电网系统模型[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1605-1610.
LIU Xianzheng, WANG Xingcheng, WEN Jialiang, et al. System model of DC grid based on bond graph method[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1605-1610.
- [15] 赵光宙. 现代控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [16] DORF R C, BISHOP R H. Modern control systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [17] 王宇. 直流电网控制方法及仿真研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2013: 35-38.
WANG Yu. The research on the control strategy and simulation of DC grid[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2013: 35-38.

收稿日期: 2015-07-06; 修回日期: 2016-03-07

作者简介:

刘先正(1985-), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为风电并网及直流电网技术; E-mail: liuxianzheng@geiri.sgcc.com.cn

王兴成(1956-), 男, 通信作者, 博士, 博士生导师, 主要从事鲁棒控制理论、船舶运动控制、非线性控制、复杂系统控制等领域的研究工作;

温家良(1970-), 男, 博士, 教高, 长期从事电力电子技术及高压直流输电技术研究。

(编辑 魏小丽)