

改进型电压恢复器拓扑的模型预测控制策略

随着产生电力扰动和对电力扰动敏感的设备数量增加,电能质量问题受到了广泛的关注,电压跌落是其中一个主要问题,动态电压调节器能够明显改善电压跌落。提出一种基于PUC拓扑结构的动态电压调节器,采用多目标模型预测控制策略,当发生电压暂降时,调节串联补偿电压。冗余功率开关管状态使得输出更为灵活,可以进一步优化输出电压波形提升性能。为了验证所提出控制策略的有效性,在Matlab/Simulink中搭建仿真模型,并在690 V电压暂降实验系统中进行相应验证。

张 军/国网江苏省电力有限公司

史明明/国网江苏省电力有限公司电力科学研究院

0 引言

随着电力系统规模的增长,各类对供电质量敏感的电力负载也迅速发展,电能质量问题日益受到关注,其中最为突出、影响最大的问题就是电压暂降^[1-3]。电压暂降是指电力系统中某点工频电压有效值暂时降低至额定电压的10%~90%,并持续10 ms~1 min,此期间内系统频率仍为标称值,然后又恢复到正常水平的现象^[4]。

在电力系统运行过程中,电压暂降无法完全避免,如大型负载的投切、变压器满载运行和线路故障等,均会造成电压暂降^[5-6]。电压暂降的时间过长,电压跌落水平过低,将会导致设备意外停机,影响工厂正常生产^[7]。据统计,大型计算机数据中心2 ms的电压暂降引起的平均损失达60万美元,电压暂降是欧美发达国家关注度最高的电能质量问题。

动态电压调节器(Dynamic Voltage Restorer, DVR)是公认的对电压暂降最有效的解决方案,它能在10 ms内将电网

暂降补偿至正常值,对于提高敏感设备的供电质量有明显效果。原理上,DVR相当于在系统中串联一个受控电压源,通过主动控制的方式,比较参考电压和实际公共连接点电压,使装置输出电压抵消电压暂降的影响,保证负载的正常稳定运行。目前,国内外学者针对DVR提出多种拓扑结构以提高其性能和耐受电压水平,如级联H桥^[8]、飞跨电容级联变换器^[9]、钳位二极管^[10]和堆叠式多级变换器^[11]等。

PUC变换器是最近提出的一种新型级联变换器拓扑结构^[12]。该种拓扑结构中采用一个独立的电压源,三个子模块进行级联仅需要6个功率开关管,与其他拓扑结构相比,大大降低了功率开关管个数,同时降低了系统成本。除此之外,PUC拓扑结构采用储能电容的形式,提升了系统整体性能。

本文基于五电平PUC逆变器的电压暂降恢复器,采用模型预测控制策略对系统变量进行控制,实现对电压暂降的补偿。针对整个系统的离散模型,对每个采样点的滤波电流、电容电压以及补偿电压进行预测,再通过多目标成本函数优化配置。基于Matlab/Simulink软件,仿真验证本文所提出的控制策略,并搭建690 V电压暂降实验系统,验证本文所提出控制策略的正确性和有效性。

1 拓扑结构和建模

1.1 PUC拓扑结构

PUC拓扑结构中仅需要一个直流电



张 军/高级工程师

关键词/Keywords

电压暂降 ·
动态电压调节器 ·
模型预测控制 ·
PUC拓扑 ·

源,而一般的多电平逆变器直流侧可能需要多个直流源。此外,基于PUC结构的逆变器不需要通过变压器和电网相连。PUC结构能够提供更加灵活的输出电压,输出的性能也更优异。

PUC逆变器是一种多电平逆变器结构,由多个基本结构组合而成,每个基本机构由一个电容和两个开关元件组成^[13]。PUC的拓扑结构如图1所示。如果逆变器中含有 n 个基本结构,则一共有 $2n$ 个开关元件, $n-2$ 个电容。图1中最基本结构的两个开关元件不能同时导通,正常工作时处于一个导通一个关断的状态。表1给出了不同开关状态和输出电压之间的对应关系。五电平PUC逆变器共有八种工作状态,输出电压有五种电平,即0、 $V_{dc}/2$ 、 $-V_{dc}/2$ 、 V_{dc} 和 $-V_{dc}$ 。同时为了保证输出电压为无电平,电容 C_2 的电压应保持为 $V_{dc}/2$ 。

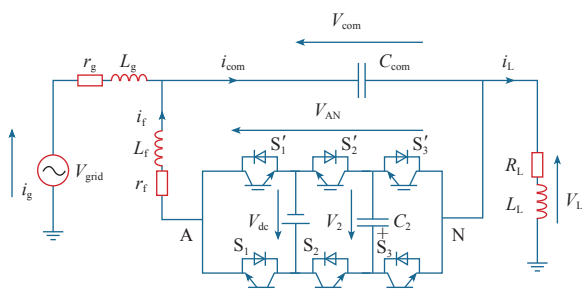


图1 基于五电平PUC的动态电压补偿器结构示意图

表1 开关状态和补偿电压之间的关系

开关状态	S_1	S_2	S_3	V_{AN}
1	0	0	0	0
2	0	0	1	$-V_{dc}/2$
3	0	1	0	$-V_{dc}/2$
4	0	1	1	$-V_{dc}$
5	1	0	0	V_{dc}
6	1	0	1	$V_{dc}/2$
7	1	1	0	$V_{dc}/2$
8	1	1	1	0

1.2 建模分析

为方便分析,设补偿电压为 $V_{com}(t)$,电容电压为 $V_2(t)$,输出电流为 $i_f(t)$,每个基本结构的开关元件的开关状态为 S_i 和 S'_i 。根据基尔霍夫定律,能够得到以下关系^[14]

$$C_{com} \frac{dV_{com}(t)}{dt} = i_f(t) + i_g(t) \quad (1)$$

$$C_2 \frac{dV_2(t)}{dt} = (S_3 - S_2)i_f(t) \quad (2)$$

$$L_f \frac{di_f(t)}{dt} = V_{AN}(t) - V_{com}(t) - r_f i_f(t) \quad (3)$$

2 模型预测控制

本文采用模型预测控制(MPC),通过选择合适的控制策略最小化目标函数,最终解决多目标优化问题^[15-17]。

MPC策略通过在离散情况下采用如式(4)所示的泰勒近似预测不同控制开关状态对应的补偿电压 $V_{com}(k+1)$ 、电容电压 $V_2(k+1)$ 以及输出电流 $i_f(k+1)$,即

$$x(k+1) = x(k) + \dot{x}(k)T_s \quad (4)$$

式中, T_s 为采样时间。

对式(1)~式(3)进行离散化处理得到

$$V_{com}(k+1) = V_{com}(k) + \frac{T_s}{C_{com}}[i_f(k) + i_g(k)] \quad (5)$$

$$V_2(k+1) = V_2(k) + \frac{T_s}{C_2}(S_3 - S_2)i_f(k) \quad (6)$$

$$i_f(k+1) = i_f(k) \left(1 - \frac{r_f}{L_f}T_s\right) + \frac{T_s}{L_f}[V_{AN}(k) - V_{com}(k)] \quad (7)$$

预测控制器的输入为直流侧电压 $V_{dc}(k)$ 、电网电流 $i_g(k)$ 、DVR输出电流 $i_f(k)$ 、电容电压 $V_2(k)$ 、补偿电压 $V_{com}(k)$ 、DVR输出电流参考值 $i_f^*(k)$ 以及补偿电压参考值 $V_{com}^*(k)$ 。补偿电压参考值 $V_{com}^*(k)$ 可以由实际电网电压 $V_{grid}(k)$ 和负载电压参考值 $V_L^*(k)$ 计算得到。DVR输出电流参考值 $i_f^*(k)$ 由实际补偿电流 $i_{com}(k)$ 减去负载参考电流 $i_L^*(k)$ 得到。目标函数表达式为

$$g = \lambda_v |V_2^* - V_2(k+1)| + \lambda_{com} |V_{com}^* - V_{com}(k+1)| + \lambda_i |i_f^* - i_f(k+1)| \quad (8)$$

式中, λ_v 、 λ_i 和 λ_{com} 为权重因子。开关状态的选取原则是在下一采样周期内使目标函数最小化。具体的模型预测控制的框图如图2所示。权重因子的选取对控制的性能影响较大,在有多重约束的问题中,多个权重因子的选取更加困难。在本文中,先选定输出电流的权重 λ_i 和电容电压的权重

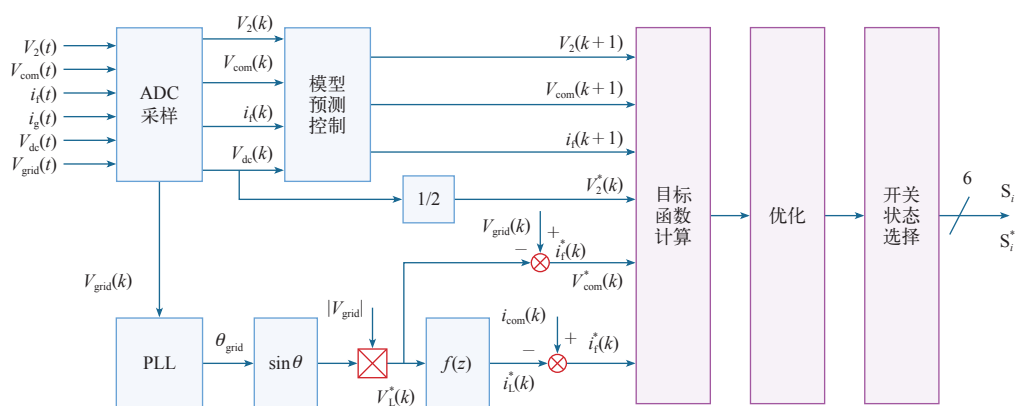


图2 模型预测控制框图

λ_V , 然后调节补偿电压的权重 λ_{com} , 简化参数选取难度。

3 仿真与实验研究

3.1 仿真分析

为了验证本文所提出控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink中搭建仿真模型。系统中参数如表2所示。

表2 仿真参数表

参数	数值
网侧电压 V_{grid}/V	220
直流侧电压 V_{dc}/V	400
滤波电感 L_f/mH	0.8
滤波电容 $C_{com}/\mu F$	48
内部电容 $C_2/\mu F$	100
负载	100 kW + 5 kvar

当系统中出现七个周期的60%的电压暂降时, 电压跌落波形和DVR补偿电压波形如图3、图4所示。从图中可以看出, 在系统发生电压暂降之前, DVR输出电压在0 V附近; 在发生电压跌落之后, 所需补偿的电压由DVR产生, 保证负载稳定运行, 由此可以看出本文所提出的控制策略具有

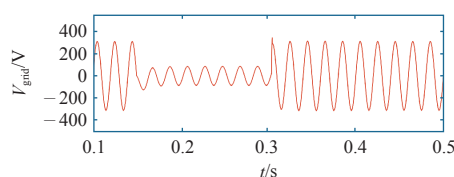


图3 电压跌落波形

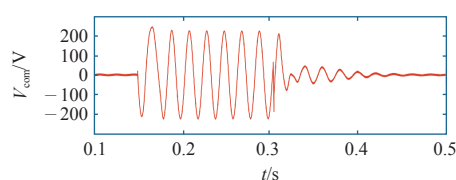


图4 DVR补偿电压波形

有效性。

当DVR直流侧电压从400 V降低至350 V时, 系统发生电压暂降, DVR补偿电压波形如图5所示。从图中可以看出, 直流电压波动不会对DVR运行性能产生较大影响。

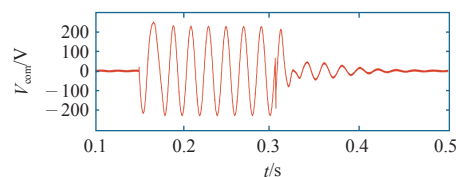


图5 DVR补偿电压波形

输出滤波电流、补偿电流以及负载电流波形如图6所示。从图中可以看出, 在正常运行过程中, 补偿电容电流基本为0, 因此, 滤波电流与负载电流相位是相反的。一旦发生电压暂降, 则会产生正弦的补偿电流, 保证负载正常运行。

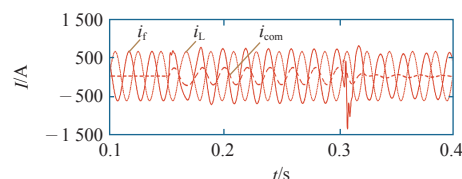


图6 滤波电流、补偿电流和负载电流波形

3.2 实验研究

为了进一步验证本文所提出的DVR控制策略

有效性,在690 V实验系统中进行相应实验,实验接线如图7所示。DVR串联在电网、电压跌落发生装置和负载之间,若产生电压跌落,则DVR投入运行以补偿跌落电压幅值。

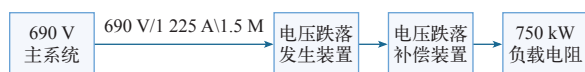


图7 实验接线图

当电压跌落10%之后,电网侧电压波形、电压跌落有效值曲线、线路电流波形和线路电流有效值曲线如图8所示。当DVR投入运行之后,补偿之后的线路电压波形和线路电压THD变化曲线如图9所示。

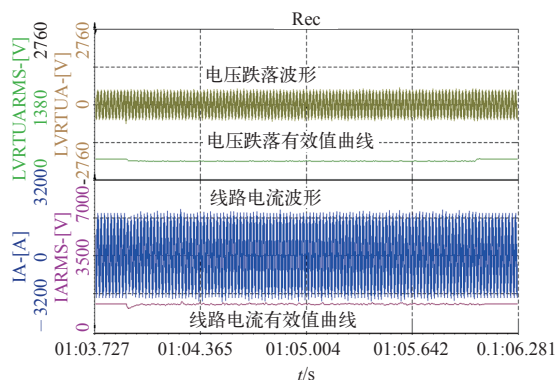


图8 电网侧10%电压跌落波形

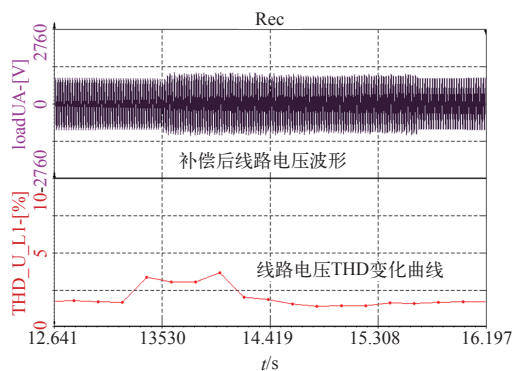


图9 动态电压补偿波形

从图中可以看出,电压跌落10%,持续大概2.1 s,在补偿之后,线路电压恢复至正常值,线路电压THD最高达到3.63%,稳定之后,THD降低至2%左右。由此可以看出本文所采用的DVR在10%电压暂降实验中能够维持负载电压稳定,保证负载安全稳定运行。

在此基础上,当电压跌落80%之后,电网侧

电压波形、电压跌落有效值曲线、线路电流波形和线路电流有效值曲线如图10所示。当DVR投入运行之后,补偿之后的线路电压波形和线路电压THD变化曲线如图11所示。

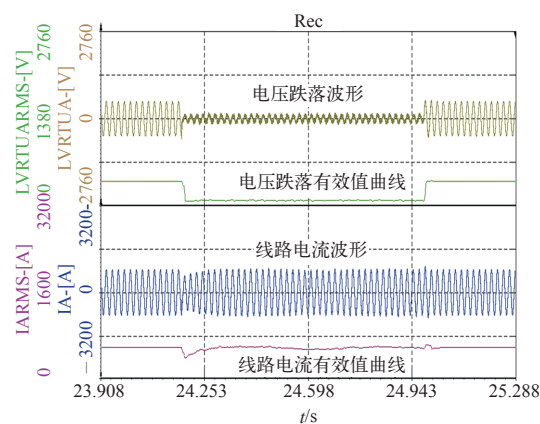


图10 电网侧80%电压跌落波形

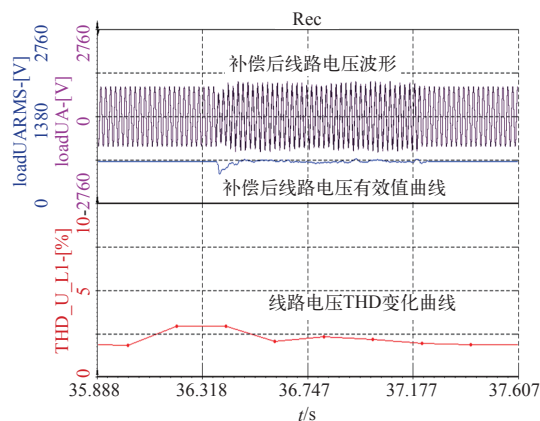


图11 动态电压补偿波形

从图中可以看出,电压跌落80%,持续时间大约为0.7 s,在补偿之后,线路电压能够恢复至正常值,线路电压THD最高达到2.94%,稳定之后,线路电压THD降低至2%左右。综合考虑10%电压暂降实验和80%电压暂降实验,动态电压补偿设备能够在电网发生电压跌落时对电网电压进行补偿,补偿准确度在 $\pm 5\%$ 范围以内,补偿稳定后的谐波电压总畸变率在2%以下。

4 结束语

本文提出一种基于PUC拓扑结构的五电平DVR补偿装置,用以降低电压暂降对系统和负载造成的影响。采用模型预测控制,在实现电压补偿的同时,还可以调节PUC中电容电压和滤波电

- [1] 付学谦, 陈皓勇, 刘国特, 等. 分布式电源电能质量综合评估方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (25) : 4270-4276.
- [2] 张逸, 林焱, 吴丹岳. 电能质量监测系统研究现状及发展趋势 [J]. 电力系统保护与控制, 2015 (2) : 138-147.
- [3] 陈鹏伟, 肖湘宁, 陶顺. 直流微网电能质量问题探讨 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (10) : 148-158.
- [4] 张宸宇, 史明明, 范忠, 等. 电压暂降事件分类及短路类型识别研究 [J]. 电力工程技术, 2018 (2) : 102-107, 113.
- [5] 司学振, 李琼林, 杨家莉, 等. 基于实测数据的电压暂降特性分析 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37 (12) : 144-149.
- [6] Fitzner C, Barnes M, Green P. Voltage sag detection technique for a dynamic voltage restorer [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40 (1) : 203-212.
- [7] 徐永海, 韦鹏飞, 李晨懿, 等. 电压暂降相位跳变及其对敏感设备的影响研究 [J]. 电测与仪表, 2017, 54 (21) : 105-111.
- [8] 涂春鸣, 吴连贵, 姜飞, 等. 基于输出最大电平数的级联H桥型动态电压恢复器控制策略 [J]. 电网技术, 2017, 41 (3) : 948-955.
- [9] McGrath B P, Holmes D G. Analytical modelling of voltage balance dynamics for a flying capacitor multilevel converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23 (2) : 543-550.

- [10] Boonchiam P, Mithulanathan N. Diode-clamped multilevel voltage source converter based on medium voltage DVR [C]. Esd. OAI, 2008; 62-67.
- [11] Sadigh A K, Babaei E, Hosseini S H, et al. Dynamic voltage restorer based on stacked multicell converter [C]. IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications, 2009; 419-424.
- [12] Trabelsi M, Bayhan S, Metry M, et al. An effective Model Predictive Control for grid connected Packed U Cells multilevel inverter [C]. Power and Energy Conference, Illinois, IEEE, 2016; 1-6.
- [13] Ounejjar Y, Al-Haddad K, Gregoire L A. Packed U cells multilevel converter topology: theoretical study and experimental validation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (4): 1294-1306.
- [14] Vahedi H, Al-Haddad K. Real-time implementation of a packed U-cell seven-level inverter with low switching frequency voltage regulator [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (8): 5967-5973.
- [15] 韩民晓, 翟冬玲, 唐晓骏. 连接低惯量系统的柔性直流输电模型预测控制 [J]. 电工技术学报, 2017, 32 (22): 198-206.
- [16] 梁营玉, 张涛, 刘建政, 等. 模型预测控制在MMC-HVDC中的应用 [J]. 电工技术学报, 2016, 31 (1): 128-138.
- [17] 方志强, 王晓辉, 夏通. 基于长短期记忆网络的售电量预测模型研究 [J]. 电力工程技术, 2018, 37 (3): 78-83.
- [18] 张宸宇, 杨赞, 袁晓冬, 等. 考虑阻尼和惯性的虚拟同步机建模方法研究 [J]. 电力工程技术, 2018, 37 (5): 45-49.

44 | 中国工业工程 · 工业工程 · 2018年第37卷第24期