

DOI: 10.7667/PSPC170749

模块化限流式统一潮流控制器的改进调制与控制策略研究

陆海强, 王金跃, 钱进

(嘉兴市恒创电力设备有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 统一潮流控制器(UPFC)能灵活调节电网潮流, 是能源互联网的重要设备。提出了一种模块化多电平换流器与固态限流器相结合的模块化限流式统一潮流控制器的拓扑结构。首先分析该拓扑结构的工作机理, 推导出系统的数学模型。提出一种改进型最近电平调制策略, 能有效提高交流输出电压的波形质量。根据数学模型提出了MMC-UPFC的串并联侧的控制策略。同时, 提出了交流系统故障时, 限流器的控制策略。最后在PSCAD/EMTDC平台建模仿真验证所提拓扑结构、调制策略及控制策略的有效性。

关键词: 统一潮流控制器; 固态限流器; 模块化多电平换流器; 改进最近电平调制; 控制策略

Modified modulation and control strategy of unified power flow controller based on modular multilevel converters with solid state fault current limiter

LU Haiqiang, WANG Jinyue, QIAN Jin

(Jiaxing Hengchuang Electric Device Co., Ltd, Jiaxing 314000, China)

Abstract: Unified Power Flow Controller (UPFC) is an essential device of the energy internet due to its flexible regulating ability on power flow. This paper proposes a topology of a Modular Multilevel Converter (MMC) based UPFC combined with a Solid State Fault Current Limiter (SSFCL). Firstly, working mechanism and mathematical model of the topology are analyzed. Secondly, a modified Nearest Level Modulation (NLM) which can effectively improve the waveform quality of output voltages is proposed. Thirdly, control strategies of the shunt and series sides of MMC-UPFC are proposed based on mathematical model. And then, the control strategy of the SSFCL is proposed when the AC fault occurs. Finally, the effectiveness of topology, modulation method and control strategies are verified by PSCAD/EMTDC simulation models.

Key words: unified power flow controller; solid state fault current limiter; modular multilevel converters; modified nearest level modulation; control strategy

0 引言

近年来, 随着智能电网和能源互联网的飞速发展, 电网潮流灵活调控的需求日益增加。作为综合性能最强的柔性交流输电系统(FACTS)装置——统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)能够灵活调控线路电压幅值、相角和阻抗等参数, 进而有效控制输电线路的潮流, 因而其越来越受到学术界和工业界的重视。目前, 在南京西环网已经有国内首套UPFC装置投入运行^[1-3]。

常规的UPFC采用两电平电压源换流器(VSC)作为串并联侧的换流装置, 在高压大容量应用场合, 两电平VSC需大量串联IGBT, 器件间的均压困难, 同时交流侧需要大容量的滤波电路^[4-5]。另一方面, 模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter,

MMC)具有模块化的结构, 能高效地串并联实现高压大功率的应用, 解决了器件均压问题, 同时输出交流电压电流波形良好, 基本不需要额外的滤波装置^[6-12]。因此, 有文献提出MMC作为UPFC的换流器^[13]。

作为FACTS装置, UPFC在现有电力电子工艺水平下, 承受高电压大电流的冲击能力有限。在装置附近发生短路故障时, 极易由于短时间承受巨大短路电流的冲击而损毁, 限制了其推广应用。针对这个问题, 从系统保护和装置保护的双重功能考虑, 学术界提出了一种固态限流器(SSFCL)与两电平UPFC通过串联侧变压器耦合的限流式UPFC的拓扑结构^[14], 并研究了其数学模型^[15]、控制策略^[16]、优化设计^[17]和保护策略^[18]。然而, 性能更加优越的基于MMC的UPFC与SSFCL结合的拓扑结构仅文

献[19]提及, 而且仅仅介绍了基本原理, 对于装置的优化设计、高效的调制策略和协调控制策略并未详细分析, 因此, 本文将重点研究基于 MMC 的 UPFC 与 SSFCL 结合的模块化限流式 UPFC(MMC-UPFC-SSFCL)的调制与控制策略。

1 拓扑结构与工作原理

1.1 拓扑结构

MMC-UPFC-SSFCL 的拓扑结构如图 1 和图 2

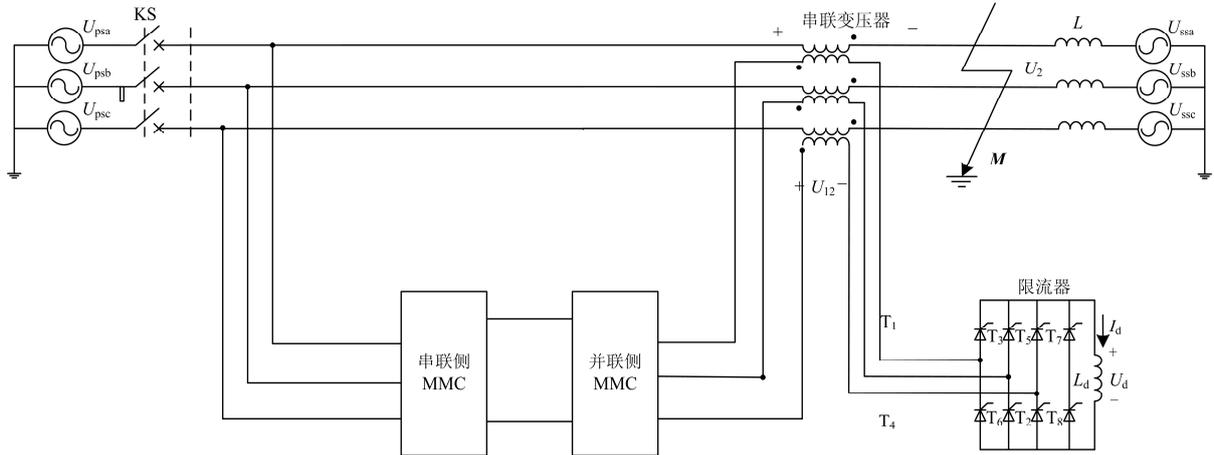


图 1 MMC-UPFC-SSFCL 整体框图

Fig. 1 Block diagram of MMC-UPFC-SSFCL

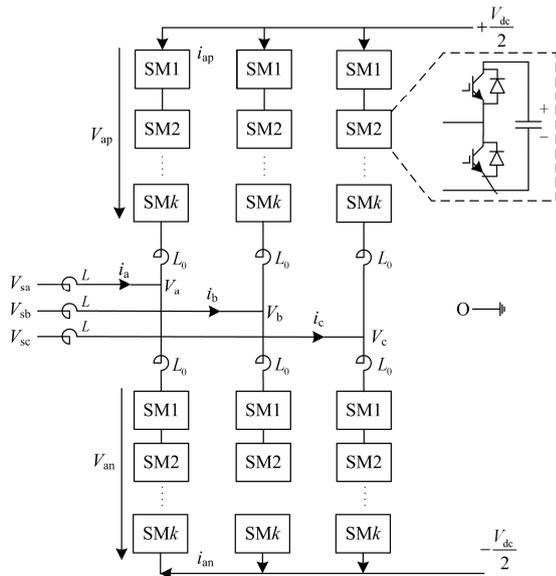


图 2 MMC 的拓扑结构

Fig. 2 Topology of MMC

1.2 工作原理

SSFCL 的工作原理: 正常工作时, 限流电感电流上升到交流电流峰值并保持不变, T7、T8 起到续流作用, 限流器模块相当于零阻抗, 装置等效为单

所示, MMC 由 3 个相单元组成, 每相包含上下两个桥臂, 每个桥臂由若干(N)个子模块和 1 个桥臂电抗(L_0)串联而成, 每个子模块可以为半桥结构也可以为全桥结构; SSFCL 由晶闸管三相桥式整流电路和限流电抗组成, T1—T6 为三相整流桥, T7、T8 为续流桥臂。MMC 模块化的结构使其具备交直流侧电压匹配能力, 传统 UPFC 必需的并联变压器可以省略, 同时由于桥臂电抗的存在, 串并联侧的连接电抗也可省略。

UPFC 模式, 当发生故障时, 反向电压迫使续流管 T7、T8 关断, 限流电抗自动插入回路, 限制短路电流, 具体推导过程和数学模型已经在很多文献详细介绍过^[20], 此处就不再赘述。

MMC 的每个桥臂等效为受控电压源, 通过调制子模块 IGBT 的通断来调节受控电压源的输出电压, 进而实现电流的调节, 以 a 相为例, MMC 平均值数学模型如下。

符号含义: p 表示上桥臂, n 表示下桥臂; N 为每个桥臂子模块个数; U_{ap} 和 U_{an} 为 a 相上、下桥臂电压; S_{ap} 和 S_{an} 为 a 相上、下桥臂调制函数; U_d 为子模块额定电压; u_{sa} 为 a 相系统电压; i_{ap} 和 i_{an} 为 a 相上下桥臂电流(方向如图 2 所示); L_0 和 R_0 为桥臂电抗及其电阻; U_{dc} 为直流电压。

$$\begin{cases} U_{ap} = S_{ap} N U_d \\ U_{an} = S_{an} N U_d \end{cases} \quad (1)$$

$$u_{sa} = \frac{1}{2} U_{dc} - U_{ap} - (L_0 \frac{di_{ap}}{dt} + R_0 i_{ap}) \quad (2)$$

$$u_{sa} = -\frac{1}{2} U_{dc} + U_{an} + (L_0 \frac{di_{an}}{dt} + R_0 i_{an}) \quad (3)$$

$$i_a = i_{an} - i_{ap} \quad (4)$$

联立式(1)一式(4)可得

$$u_{sa} - \frac{1}{2}(U_{an} - U_{ap}) = \frac{L_0}{2} \frac{di_a}{dt} + \frac{R_0}{2} i_a \quad (5)$$

$$U_{dc} - (U_{an} + U_{ap}) = L_0 \frac{d(i_{ap} + i_{an})}{dt} + R_0(i_{ap} + i_{an}) \quad (6)$$

式(5)和式(6)分别为 MMC 交流侧和直流侧的数学模型。定义 MMC 直流侧内部环流为

$$i_{acir} = \frac{1}{2}(i_{ap} + i_{an}) \quad (7)$$

式(6)改写为

$$U_{dc} - (U_{an} + U_{ap}) = 2L_0 \frac{di_{acir}}{dt} + 2R_0 i_{acir} \quad (8)$$

因此, MMC 的数学模型如式(1)、式(5)和式(8)所示, 通过控制调制函数来调节交直流电流。

2 改进最近电平调制策略

MMC 由大量子模块级联而成, 子模块的调制方法比较灵活, 总体分为两类: 脉宽调制(PWM)和最近电平调制(NLM)。PWM 调制的优点是波形质量好、谐波含量低, 缺点是控制复杂, 开关频率高, 适用于子模块数较少的应用场合; 最近电平调制通过产生误差最小的阶梯波去逼近参考正弦波, 优点是实现简单、开关频率低, 缺点是在子模块数较少的场合谐波含量较大, 因此适用于子模块数较多的场合, 目前柔性直流输电(MMC-HVDC)采用的就是最近电平调制方法。MMC-UPFC 在串联侧的电压等级较低, 子模块数远远少于 MMC-HVDC, 然而应用 PWM 调制仍然过于复杂。因此, 本节提出一种改进型最近电平调制方法, 在不增加控制复杂度的前提下, 提高最近电平调制的阶梯数, 减少输出波形谐波含量。

根据式(5)和式(8), 忽略掉桥臂电抗上的压降, 上下桥臂的参考电压为

$$U_{ap} = \frac{1}{2}U_{dc} - u_{sa} \quad (9)$$

$$U_{an} = \frac{1}{2}U_{dc} + u_{sa} \quad (10)$$

传统最近电平调制方法产生 $N+1$ 个电平, 具体调制方法如下。

图 3 所示为以 a 相上桥臂为例的传统 NLM 的总体框图, 框图 $round_{0.5}(x)$ 代表对 x 按照小数点后 1 位四舍五入取整, 框图排序算法按照文献[8]中的排序算法对子模块进行排序, 根据桥臂电流方向选取合适的子模块投切。传统 NLM 方法能产生 $N+1$ 个电平。

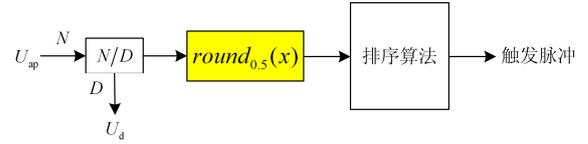


图 3 传统 NLM 总体框图

Fig. 3 Block diagram of conventional NLM

本文提出一种改进最近电平调制方法, 能在相同子模块数的情况下, 产生 $2N+1$ 个电平, 其调制方法图 4。

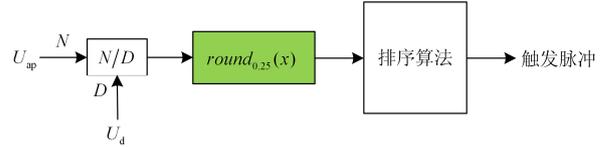


图 4 改进型 NLM 总体框图

Fig. 4 Block diagram of modified NLM

本文提出的改进型 NLM 与传统 NLM 的不同之处在于取整函数不再以小数点后 1 位进行四舍五入取整了, 而是以 0.25 作为小数部分的阈值进行取舍, 当小数部分大于或等于 0.25 时将整数部分加 1, 当小数部分小于 0.25 时, 舍弃小数部分保留整数部分。两种 NLM 调制的原理示意图如图 5 所示, 图中 u_U^{ref} 、 u_L^{ref} 分别代表上下桥臂电压参考值, u_U^{step} 、 u_L^{step} 分别代表上下桥臂电压的实际值, U_d 为子模块电压参考值。图 5 所示为传统 NLM 的工作原理, 上下桥臂电压离散化后均为 $N+1$ 个阶梯, 从图中可以看出 t_1 、 t_2 、 t_3 为上下桥臂电压离散化的时刻, 由于四舍五入时刻是相同的, 所以有上下桥臂电压相减产生的交流输出电压也为 $N+1$ 个; 图 6 所示为改进型 NLM 的工作原理, 上下桥臂电压离散化后同样为 $N+1$ 个阶梯, 由于取整函数的改进, 使得上下桥臂电压的离散化时刻不同, 因而上下桥臂电压相减产生的交流输出电压提高为 $2N+1$ 。

3 控制策略

UPFC 的主要控制思路通过调节串入线路的电压相角和幅值来调控线路潮流, 直流侧的电压则由并联侧控制。因此, 系统级的控制目标分配如下: 并联侧控制直流电压 U_{dc} 和并联侧无功功率 Q_p ; 串联侧控制线路有功功率 P 和串联侧无功功率 Q_s 。控制器采用 dq 双环解耦控制, 并联侧的控制框图如图 7。

UPFC 串联侧采用直接功率计算得到电流指令值, 在等幅值 Park 变换下, 线路 M 点的有功功率 P 和无功功率 Q 为

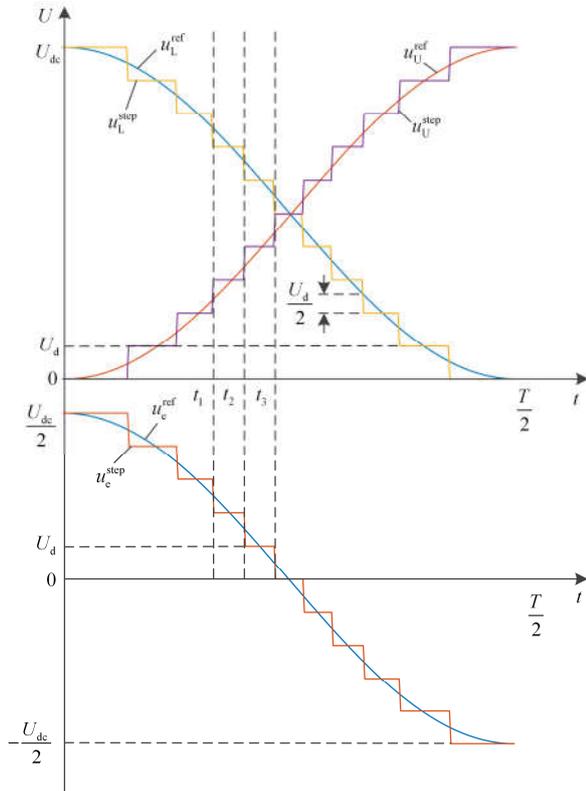


图 5 传统 NLM 工作原理

Fig. 5 Principles of the conventional NLM method

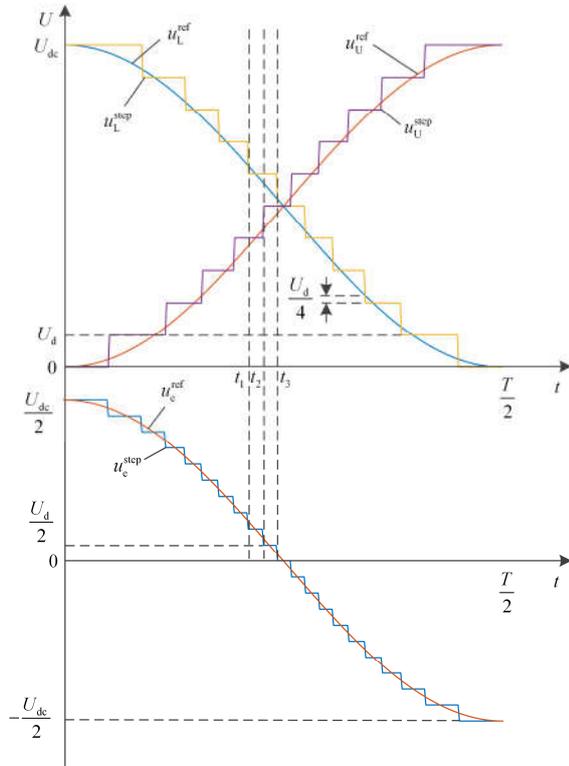


图 6 改进型 NLM 工作原理

Fig. 6 Principles of the modified NLM method

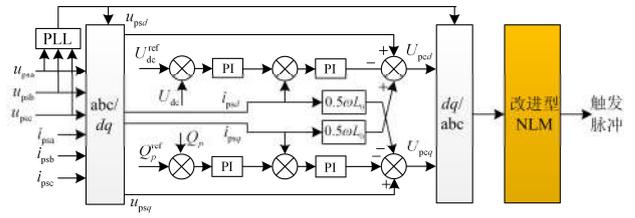


图 7 MMC-UPFC 并联侧换流器控制框图

Fig. 7 Block diagram of shunt converter in MMC-UPFC

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(u_{ssd}i_{ssd} + u_{ssq}i_{ssq}) \\ Q = \frac{3}{2}(u_{ssq}i_{ssd} - u_{ssd}i_{ssq}) \end{cases} \quad (11)$$

因此, 串联侧 MMC 的控制策略如图 8 所示。

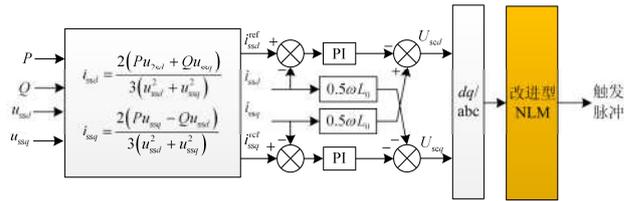


图 8 MMC-UPFC 串联侧换流器控制框图

Fig. 8 Block diagram of series converter in MMC-UPFC

图 7 和图 8 框图中的符号代表的含义如下:

u_{psa} 、 u_{psb} 、 u_{psc} 为并联侧 abc 相的系统电压; i_{psa} 、 i_{psb} 、 i_{psc} 为并联侧 abc 相电流; u_{psd} 、 u_{psq} 为并联侧 dq 轴系统电压; i_{psd} 、 i_{psq} 为并联侧 dq 轴电流; U_{pcd} 、 U_{pcq} 为并联侧 dq 轴换流器侧电压; u_{ssd} 、 u_{ssq} 为串联侧 dq 轴系统电压; i_{ssd} 、 i_{ssq} 为串联侧 dq 轴电流; U_{scd} 、 U_{scq} 为串联侧 dq 轴换流器侧电压。

考虑最恶劣的情况, 当电网故障发生在装置安装的出口附近, 限流器模块迅速自动转变为高阻状态, 直流电感自动串入故障回路限制短路电流的初始值及上升率, 同时采用逆变续流混合瞬断模式^[21]切断短路电流, 具体步骤如下:

- 1) 封锁 UPFC 串联变换器的触发脉冲, 使开关器件 IGBT 退出运行;
- 2) 封锁限流器模块所有晶闸管 T1—T8 的触发脉冲, 再在合适的时刻重新触发 T7 和 T8, 为电感电流提供续流通路, 此时晶闸管桥 T1—T6 自动关断, 切断了短路电流。

4 仿真实验

为了验证限流式模块化 UPFC 的拓扑结构、所提出的改进最近电平调制策略和控制策略, 在

PSCAD/EMTDC 软件平台搭建了仿真模型，电路扑如图 1 所示。

4.1 改进最近电平调制策略验证

为验证所提改进最近电平调制策略的有效性，在 PSCAD/EMTDC 软件上搭建了一个子模块数较少的 MMC-UPFC-SSFCL 系统，系统的主要参数如表 1 所示。

表 1 MMC-UPFC-SSFCL 系统 A 参数

Table 1 System A parameters of MMC-UPFC-SSFCL

项目	符号	值
额定交流电压	u_s	10 kV
交流电抗	L	5 mH
交流线路电阻	R	0.03 Ω
额定频率	f	50 Hz
额定直流电压	U_{dc}	10 kV
桥臂缓冲电抗	L_0	15 mH
桥臂电阻	R_0	1 Ω
桥臂总子模块数	N_{sum}	10
子模块电容电压	U_c	1 kV
子模块电容值	C	7 000 μF

图 9 所示为采用改进最近电平调制策略后 UPFC 并联侧 a 相的部分波形图，图中 u 代表并联侧 MMC 输出的交流电压， u_{ap} 、 u_{an} 分别为 a 相上下桥臂输出的电压。从图中可以看出， u_{ap} 、 u_{an} 为 11 个阶梯，而产生的交流电压为 21 个阶梯，大大减小了交流电压的谐波畸变率，验证了前述理论分析。

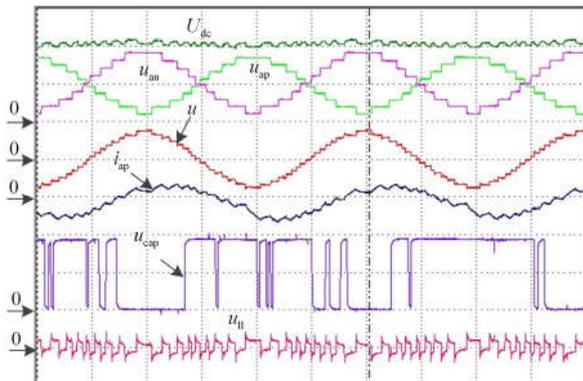


图 9 改进最近电平调制策略波形

Fig. 9 Waveforms by the modified NLM method

4.2 正常运行状态验证

为了验证 MMC-UPFC-SSFCL 在高压大功率下的运行效果，在 PSCAD/EMTDC 软件平台搭建了 110 kV 电压等级的仿真模型，系统参数如表 2 所示。

为了验证 MMC-UPFC-SSFCL 的潮流调节能力，设定有功功率从 -50 MW 到 -100 MW 的阶跃响应，保持无功功率始终为 0。图 10 显示，有功无功功率解耦控制性能良好，无静态误差，运行稳定。

表 2 MMC-UPFC-SSFCL 系统 B 参数

Table 2 System B parameters of MMC-UPFC-SSFCL

项目	符号	值
额定交流电压	u_s	110 kV
交流电抗	L	5 mH
交流线路电阻	R	0.03 Ω
额定频率	f	50 Hz
额定直流电压	U_{dc}	30 kV
桥臂缓冲电抗	L_0	15 mH
桥臂电阻	R_0	1 Ω
桥臂总子模块数	N_{sum}	70
子模块电容电压	U_c	1 kV
子模块电容值	C	7 000 μF

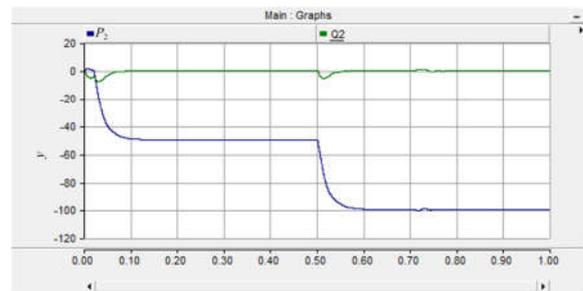


图 10 输电线路有功无功功率

Fig. 10 Active and reactive power of transmission line

图 11 显示交流电流稳态波形质量高、谐波含量低，阶跃响应速度快，动态性能优良。

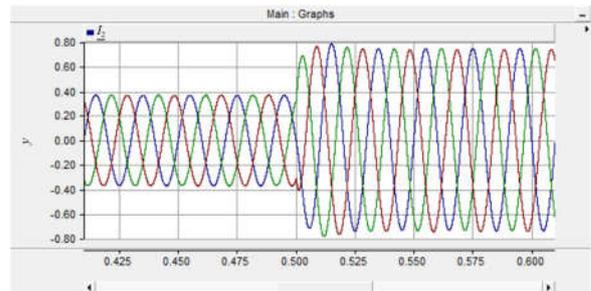


图 11 输电线路三相交流电流

Fig. 11 Three phase AC currents of transmission line

图 12 为直流电压波形，可见直流电压波形稳定，无稳态误差。

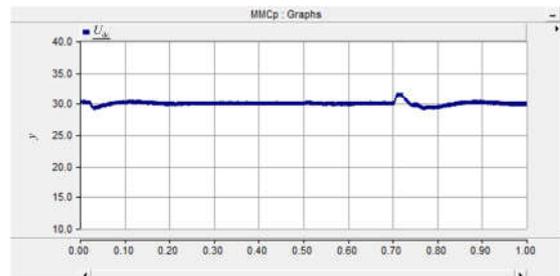


图 12 直流电压

Fig. 12 DC voltage

图 13 为子模块电压波形, 以一个子模块为例, 从图中可见子模块电压在额定电压附近波动, 波动比例不超过 10%。

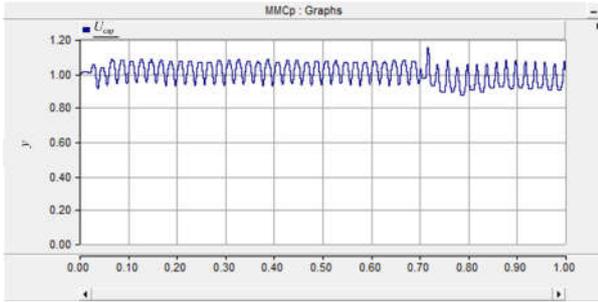


图 13 子模块电压

Fig. 13 Voltage of sub-module capacitor

4.3 交流系统故障状态验证

为了验证交流系统故障时 SSFCL 的响应情况, 在仿真模型中设置在 $t=2$ s 时在图 1 的 M 点发生三相永久短路故障, 短路点对地的电阻为 0.02Ω 。

从图 14 中可以看出, 正常稳定工作时, SSFCL 的限流电感电流稳定在交流电流的峰值, 当故障发生后, 系统约延迟了 3 ms 响应故障, 此时经过一个逆变续流过程, 短路电流快速减小, 直到重新触发 T7 和 T8 后, 电感电流继续衰减, 系统短路电流被切断。

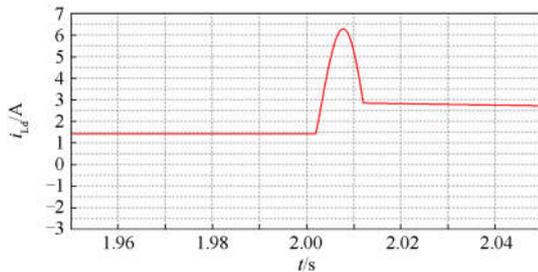


图 14 交流短路时 SSFCL 限流电感中的电流波形

Fig. 14 Current waveform of SSFCL inductor when AC fault occurs

图 15 中显示了限流器发挥限流作用的过程

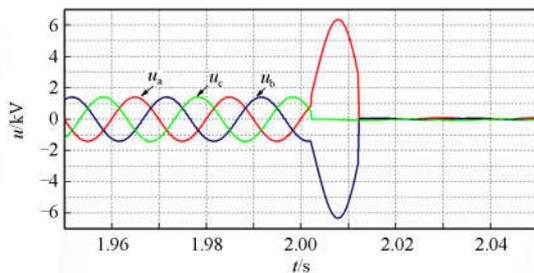


图 15 短路故障时串联侧三相电压波形

Fig. 15 Series-side three-phase voltages under fault conditions

中串联侧交流电压的响应波形, 最高电压被限定在 6.5 kV , 并迅速下降为 0, 避免了过高的电压损坏 UPFC 模块。

5 结论

本文介绍了 MMC-UPFC-SSFCL 的拓扑结构, 提出了一种改进型最近电平逼近的调制策略, 该策略在保持传统最近电平调制策略简单高效、开关频率低的优点的同时, 能提高交流电压输出电平数, 降低谐波含量; 提出了 UPFC 串并联侧的控制策略以及 SSFCL 在故障时的控制策略。该 MMC-UPFC-SSFCL 与传统 UPFC 相比具有容量大、扩展性强及抗故障能力强等特点。

参考文献

- [1] 祁万春, 杨林, 宋鹏程, 等. 南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 92-96.
QI Wanchun, YANG Lin, SONG Pengcheng, et al. UPFC system control strategy research in Nanjing Western Power Grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 92-96.
- [2] 陈刚, 李鹏, 袁宇波. MMC-UPFC 在南京西环网的应用及其谐波特性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 121-127.
CHEN Gang, LI Peng, YUAN Yubo. Application of MMC-UPFC on Nanjing Western Grid and its harmonic analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 121-127.
- [3] 蔡晖, 祁万春, 黄俊辉, 等. 统一潮流控制器在南京西环网的应用[J]. 电力建设, 2015, 36(8): 73-78.
CAI Hui, QI Wanchun, HUANG Junhui, et al. Application of UPFC in Nanjing Western Power System[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(8): 73-78.
- [4] YU Q, ROUND S D, NORUM L E, et al. Dynamic control of a unified Power flow controller[C] // Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 23-27, 1996, Baveno, Italy: 508-514.
- [5] 刘新宇, 姚致清, 陈铁军. 变速恒频双馈风力发电机结构分散化并网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 97-104.
LIU Xinyu, YAO Zhiqing, CHEN Tiejun. Cutting-in control of the doubly-fed variable speed and pitch wind-power generator based on structure decentralized control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 97-104.
- [6] 胡鹏飞, 江道灼, 周月宾, 等. 模块化多电平换流器子模块故障冗余容错控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 66-70.
HU Pengfei, JIANG Daozhuo, ZHOU Yuebin, et al. Redundancy fault-tolerated control strategy for sub-module faults of modular multilevel converters[J].

Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 66-70.

[7] 胡鹏飞, 林志勇, 周月宾, 等. 适用于大规模 MMC 的分布式控制系统及两级均压策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 79-84.

HU Pengfei, LIN Zhiyong, ZHOU Yuebin, et al. Distributed control system and two-layer voltage balancing method for large-scale modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 79-84.

[8] 胡鹏飞. 基于多电平换流器的柔性直流输电技术若干关键问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.

HU Pengfei. Study on several key issues in flexible HVDC multilevel transmission based on multilevel converters[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

[9] HU P, JIANG D, ZHOU Y, et al. Energy-balancing control strategy for modular multilevel converters under submodule fault conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 5021-5030.

[10] 杨晓楠, 陈红坤, 石晶, 等. 模块化多电平换流器启停控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 156-162.

YANG Xiaonan, CHEN Hongkun, SHI Jing, et al. Start/shutdown control strategy of modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 156-162.

[11] 李斌, 李晔, 何佳伟, 等. 基于模块化多电平的柔性直流系统故障稳态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 1-8.

LI Bin, LI Ye, HE Jiawei, et al. Stable fault characteristic analysis of the DC system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 1-8.

[12] 李欢, 田新成, 张建坡. 模块化多电平换流器改进型子模块拓扑仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 95-101.

LI Huan, TIAN Xincheng, ZHANG Jianpo. Simulating research of improved topologies of modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 95-101.

[13] 薛英林, 徐政. 基于箝位双子模块的 MMC-HVDC 启动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 1-4.

XUE Yinglin, XU Zheng. Start control for the MMC-HVDC system based on clamp double submodule[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 1-4.

[14] 桂帆, 江道灼, 林志勇, 等. 一种新型限流式统一潮流控制器的设计与研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2187-2193.

GUI Fan, JIANG Daozhuo, LIN Zhiyong, et al. Design and research of a novel unified power flow controller with fault current limiter[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2187-2193.

[15] 孔祥平, 李鹏, 黄浩声, 等. 统一潮流控制器对线路纵联保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 14-21.

KONG Xiangping, LI Peng, HUANG Haosheng, et al. Impact analysis of unified power flow controller on transmission line pilot protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 14-21.

[16] 易成星, 周前, 杨伟. 统一潮流控制器在风电机组并网运行中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 46-51.

YI Chengxing, ZHOU Qian, YANG Wei. Implementation of UPFC on wind farm interconnected to power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 46-51.

[17] 沈忱, 江道灼, 吕文韬, 等. 限流式统一潮流控制器参数设计及设计实例[J]. 电力建设, 2013, 34(11): 1-6.

SHEN Chen, JIANG Daozhuo, LÜ Wentao, et al. Parameters design and example of unified power flow controller with fault current limiting[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(11): 1-6.

[18] 刘玥朋, 江道灼, 莫育杰. 限流式 UPFC 中 UPFC 模块与限流器模块的交互影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 36-42.

LIU Yapeng, JIANG Daozhuo, MO Yujie. Analysis of interaction between unified power flow controller module and fault current limiter module[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 36-42.

[19] 周洋, 江道灼, 陈峰, 等. 基于模块化多电平换流器的限流式统一潮流控制器的设计[J]. 电力建设, 2015, 36(5): 7-13.

ZHOU Yang, JIANG Daozhuo, CHEN Feng, et al. Unified power flow controller design with fault current limiting based on modular multilevel converters[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(5): 7-13.

[20] 蔡永华, 江道灼, 吴兆麟. 三相桥式固态限流器数学模型及其仿真研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(5): 56-61.

CAI Yonghua, JIANG Daozhuo, WU Zhaolin. Study on mathematic model simulation of three phase solid state fault current limiter[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2004, 16(5): 56-61.

[21] 阎博, 江道灼, 吴兆麟, 等. 具有短路限流功能的统一潮流控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 69-73.

YAN Bo, JIANG Daozhuo, WU Zhaolin, et al. Design of unified power flow controller with fault current limiting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 69-73.

收稿日期: 2017-05-18; 修回日期: 2017-09-03

作者简介:

陆海强(1983—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用。E-mail: lu_haiqiang@163.com

(编辑 周金梅)