基于分裂电感的限流式 MMC-UPFC

梅 军1,何梦雪1,王 创1,刘建坤2,李 鹏2

(1. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院,江苏 南京 211100)

摘要:为了降低交流系统短路故障给基于模块化多电平换流器的统一潮流控制器(MMC-UPFC)带来的大电流冲击风险,保障电力电子设备的安全运行,提出了一种基于分裂电感的限流式MMC-UPFC。通过对桥臂电感的分裂设计和串联变压器阀侧晶闸管旁路开关空间配置的调整,实现换流器的快速保护和故障电流的有效限制。详细地阐述了该拓扑结构的限流原理,并进行了关键参数的优化设计。通过PSCAD/EMTDC软件对所提限流式MMC-UPFC拓扑结构进行建模仿真与分析,仿真结果证明了该拓扑结构具有灵活的潮流调节特性和显著的故障限流能力。

关键词:电力传输;统一潮流控制器;分裂电感;晶闸管旁路开关;参数设计;故障限流 中图分类号:TM 72;TM 46
文献标志码:A DOI:10.16081/j.epae.201910007

0 引言

í116

近年来,随着基于模块化多电平换流器的统一 潮流控制器 MMC-UPFC (Unified Power Flow Controller based on Modular Multilevel Converter)在实 际工程中的成功应用,其技术研究得到了专家学者 的广泛关注。虽然关于 MMC-UPFC 的潮流调节特 性、数学模型和控制策略等科学研究和工程经验已 较为充分^[1-6],但是由于串联型电力电子设备对系统 故障过电流的承受能力十分有限,MMC-UPFC 的串 联接入在显著改善线路潮流分布的同时,也面临着 承受大电流冲击的风险,其安全运行问题不可忽视。

目前,针对UPFC的短路保护问题,文献[7-9]采 用桥式固态限流器模块,与UPFC本体装置相结合, 在故障情况下串入直流电感,降低短路电流水平,但 UPFC串联侧换流器并未隔离短路故障,IGBT模块 仍面临着承受高电压大电流的风险。文献[10]在此 基础上,通过在限流器模块中增加全控型开关、反向 二极管和限流电容等,既限制了短路电流,又避免了 直流侧电容电压的不断增大,但进一步增加了建设 成本和占地面积。

此外,文献[11]通过在串联变压器的阀侧和网 侧分别设置短路支路和旁路电抗支路,使其具有较 好的故障限流能力,但所需配置的支路数较多,拓扑 结构较为复杂。文献[12]采用饱和铁芯型变压器作 为高温超导限流器,利用故障阶段铁芯饱和使励磁 电抗减小的方式实现限流,但该类型变压器的工程 应用较少。

在已有的 MMC-UPFC 工程中, 串联变压器阀

收稿日期:2018-12-28;修回日期:2019-08-26 基金项目:国家电网公司科技项目(5210EF17002B) Project supported by the Science and Technology Program of SGCC(5210EF17002B) 侧均配置晶闸管旁路开关TBS(Thyristor Bypass Switch),在系统故障时通过阀侧换流器的短接隔离 和串联变压器漏抗的接入,实现系统短路电流的抑 制^[13-14]。实际上,变压器漏抗值不宜选取过大,否则 将增大正常运行工况下的电压损失。

本文针对上述问题,综合考虑限流功能与UPFC 成本,提出一种基于分裂电感的新型限流式MMC-UPFC。对串联换流器桥臂电感进行一分为二的分 裂设计,并对串联变压器阀侧TBS的空间配置做出 调整。在分析新型拓扑结构的限流原理基础上,提 出分裂电感参数的设计原则及其与变压器漏感参数 的配合原则,该拓扑结构在保证设备安全的同时,可 实现对线路故障电流的有效限制,保证断路器顺利 动作,降低串联变压器正常运行时的电压损失。

1 限流式 MMC-UPFC 的拓扑结构

2 限流式 MMC-UPFC 的工作原理

2.1 基本工作原理与控制策略

MMC-UPFC由并联静止同步补偿器和串联静止同步补偿器组成,并联侧与串联侧换流器均采用背 靠背式的MMC结构。并联侧的MMC工作于整流状





态,在补偿系统无功功率的同时,维持直流电压稳定,向串联侧的 MMC 提供有功功率。串联侧的 MMC 工作于逆变状态,输出交流电压,与串联变压器阀侧的非接地端相连,通过串联变压器向输电线路注入幅值、相位可调的补偿电压,从而实现对线路 有功功率和无功功率的解耦控制。

基于分裂电感的限流式 MMC-UPFC 拓扑结构 在正常工况下,串联侧的 TBS 处于开断状态,近交流 侧电感 L_{ac}和近直流侧电感 L_{dc}串联接入各相,作为桥 臂电感 L_{arm}使用,基本工作原理与常规式 MMC-UPFC 相同。因此,常规式 MMC-UPFC 的稳态控制策略^[15] 也适用于基于分裂电感的限流式 MMC-UPFC 拓扑。 其中,并联侧 MMC采用双环解耦控制策略,串联侧 MMC采用交叉解耦控制策略,在稳态工况下,MMC-UPFC 工作于潮流调节运行模式。

2.2 短路限流原理

UPFC 安装点附近输电线路发生短路故障后, 交流电压几乎全部降落在串联变压器两侧,串联 侧 MMC 在 1 ms 内进入闭锁状态,退出运行。TBS 在 3 ms 内迅速闭合,使串联侧 MMC 处于旁路状态,同 时,近交流侧电感与变压器漏抗串联接入故障回路 中,系统进入故障限流阶段,该阶段下的系统等效电 路模型如图 2 所示。图中, i_{rL} 为交流输电线路短路 电流; X_r,X_m 分别为串联变压器高低压绕组的总漏抗 值和励磁电抗值;X_{ise}、X_{ac}分别为换流器滤波电抗、 近交流侧电抗折算到网侧的电抗值(电抗量加撇表 示由串联变压器二次侧折算到一次侧的电抗值, 后同)。





通过故障限流过程与继电保护整定值的配合, 经过20~60 ms,由断路器动作实现故障的隔离。故 障工况下的动作时序图如图3所示。图中,*i*_{TL,max}为 短路电流的最大瞬时值,在距故障时刻约半个周期 后达到;*t*₀为故障时刻;*t*₁为串联换流器闭锁时刻;*t*₂ 为TBS闭合时刻;*t*₃为断路器动作时刻。结合UPFC 拓扑和TBS动作特性,近交流侧电感能够在故障阶 段初期接入故障电流通路,保证短路故障限流和设备保护的快速性。



图3 故障工况下系统动作时序图

Fig.3 Operation sequence diagram under fault conditions

由图1中常规式MMC-UPFC和限流式MMC-UPFC的TBS配置地点可知,相较于常规式MMC-UPFC,限流式MMC-UPFC通过设计分裂电感和增加 TBS数量以及调整空间配置:一方面,能够及时旁路 串联换流器,避免换流阀过电流的危害,实现换流器 的快速保护;经TBS闭合动作后,上下桥臂近交流侧 电感接入串联变压器阀侧,再经变压器耦合至网侧, 增大故障电流通路的等效阻抗,可以在有效抑制系 统短路电流的同时与串联变压器漏抗分压,实现对 变压器和系统交流线路的保护。通过近交流侧电感 参数的优化设计,还能进一步使故障限流过程与继 电保护整定值相配合,实现故障隔离,提高继电保护 动作的可靠性。在确保限流效果的前提下,上下桥 臂近交流侧电感并联后再接入限流回路可以起到 分流作用,减小短路故障电流对单个电感的冲击。

另一方面,TBS 配置数量的增加虽然增加了投资成本,但是由于限流阶段近交流侧电感的接入及 其与串联变压器的配合,串联变压器的制造难度与 运行成本有所降低。此外,与串联变压器漏抗限流 的方案相比,分裂电感的设计可以在一定程度上降 低串联变压器的漏抗值,从而减少变压器的占地面 积;与桥式固态限流器方案相比,基于分裂电感的限 流式 MMC-UPFC 拓扑结构所需要的电力电子器件 较少,在减少开关损耗的同时也降低了设备和用地 成本。

3 限流式 MMC-UPFC 参数设计

3.1 分裂电感的设计

基于 2.2 节限流式 MMC-UPFC 的原理分析,本 节对分裂电感的参数进行优化设计。在故障限流阶 段,桥臂电感中由近交流侧电感承担限流任务,因 此,电感参数设计主要针对近交流侧电感进行,在确 定近交流侧电感值和桥臂电感值后,近直流侧电感 值随之确定。设变压器网/阀侧变比为k,则反射阻 抗满足 $Z'=k^2Z$ 。由于励磁阻抗 X_m 通常取值较大,为 简化计算可视作开路,则图2所示故障电流回路的 等效阻抗 X_{eq} 可表示为式(1),式(2)为故障回路等效 电感表达式。

$$X_{\rm eq} = X_{\rm T} + X'_{\rm rac} + X'_{\rm ac} / 2 \tag{1}$$

$$L_{\rm eq} = L_{\rm T} + k^2 \left(L_{\rm se} + L_{\rm ac} / 2 \right) \tag{2}$$

其中, L_{eq} 为故障回路的等效电感; L_r 为串联变压器漏 感值。假设在 $t=t_0=0$ 时刻发生短路故障,则线路故 障电流 i_{r_1} 满足:

$$\begin{cases} i_{\rm TL}(0) = I_{\rm N} \\ L_{\rm eq}(di_{\rm TL}/dt) + ri_{\rm TL} = E_{\rm m} \sin(\omega t) \end{cases}$$
(3)

其中,*I*_N为短路故障发生前线路电流瞬时值;ω为工 频角频率。

求解微分方程可得故障电流如下:

$$i_{\text{TL}}(t) = \left\{ I_{\text{N}} - \frac{E_{\text{m}} \sin\left[-\arctan\left(\omega L_{\text{eq}}/r\right)\right]}{\sqrt{r^{2} + (\omega L_{\text{eq}})^{2}}} \right\} e^{-rt/L_{\text{eq}}} + \underbrace{E_{\text{m}} \sin\left[\omega t - \arctan\left(\omega L_{\text{eq}}/r\right)\right]}_{\sqrt{r^{2} + (\omega L_{\text{eq}})^{2}}} \left(4\right)$$

故障电流由直流衰减分量与交流稳态分量组成,如图4所示。图中,t_d为故障电流直流分量衰减到0所需的时间;t_{b,1}<t_d;t_{b,2}>t_d。



图4 线路故障暂态电流变化波形

Fig.4 Waveforms of line fault transient current variation

在故障电流定量分析的基础上,提出近交流侧 电感的设计原则。

3.1.1 交流线路限流要求

假设断路器故障检测装置在t_b时刻检测到故障 并作出相应动作,则此时,故障电流的值应满足:

$$I_{\text{set}} < i_{\text{TL}}(t_{\text{b}}) < I_{\text{jmax}}$$
(5)

其中,*I*_{set}为继电保护电流整定值;*I*_{jmax}为断路器最大 开断电流(目前存在的规格为36、50kA等)。

根据故障情况下交流系统暂态电流的变化规律 (以三相电流某一相为例), t_b 与 t_d 的关系存在 $t_b < t_d$ 和 $t_b > t_d$ 2类情况,如图4中 $t_{b,1}$ 和 $t_{b,2}$ 所示,则对应时刻 的故障电流有效值如下:

$$\begin{cases} I_{\text{TL},1} = A e^{-rt_1/L_{\text{eq}}} + \frac{E_{\text{m}}/\sqrt{2}}{\sqrt{r^2 + (\omega L_{\text{eq}})^2}} & t_{\text{b},1} < t_{\text{d}} \\ I_{\text{TL},2} = \frac{E_{\text{m}}/\sqrt{2}}{\sqrt{r^2 + (\omega L_{\text{eq}})^2}} & t_{\text{b},2} > t_{\text{d}} \end{cases}$$

$$E_{\text{sin}} \left[-\arctan(\omega L_{\text{s}}/r) \right]$$

$$(6)$$

$$\ddagger \psi, A = I_{\rm N} - \frac{\mathcal{L}_{\rm mon} \left[- \frac{\omega \mathcal{L}_{\rm eq}}{\sqrt{r^2 + (\omega \mathcal{L}_{\rm eq})^2}} \right]_{\circ}$$

已知
$$I_{\text{TL},1} > I_{\text{TL},2}$$
,并结合式(5),可得:

$$\begin{cases} I_{\text{TL},2} > I_{\text{set}} \\ I_{\text{TL},1} < I_{\text{jmax}} \end{cases}$$
(7)

为简化计算,仅考虑最大电流有效值I_{TLense},即:

$$I_{\text{TL},1} \leq I_{\text{TL},\max} < I_{\text{jmax}}$$
(8)

$$I_{\rm TL,max} = K_{\rm M} I_{\rm TL,2} \tag{9}$$

其中,K_M为短路电流冲击系数。

则式(7)又可进一步简化为:

$$I_{\text{set}} < I_{\text{TL},2} < I_{\text{jmax}} / K_{\text{M}}$$

$$(10)$$

3.1.2 直流分量衰减时间常数

由式(4)可得,故障电流中直流衰减分量的时间 常数与等效电感值呈正比关系。近交流侧电感的接 入使故障电流通路的等效电感值增大,则电感的选 取应满足直流分量衰减时间常数不至于过大:

$$\tau = L_{\rm eq} / r < \tau_{\rm max} \tag{11}$$

其中,_{7max}为时间常数最大值。

3.1.3 拓扑结构限制

本文所提出的限流式MMC-UPFC拓扑结构中, 近交流侧电感L_{ac}和近直流侧电感L_{dc}共同组成了 MMC桥臂电感,则L_{ac}还应满足:

$$L_{\rm ac} = \lambda L_{\rm arm} \quad 0 < \lambda < 1 \tag{12}$$

其中,λ为比例系数。已有研究对MMC桥臂电感的 参数选择与优化做出详细分析^[16],此处不再赘述。 综合上述计算与分析,提出限流式MMC-UPFC结构 中近交流侧电感的选取原则,如式(13)所示。

$$\begin{cases} L_{\text{ac,max}} = 2 \left[\sqrt{\left(\frac{K_{\text{M}}^{2} E_{\text{m}}^{2}}{2I_{\text{jmax}}^{2}} - r^{2}\right)} / \omega^{2} - L_{\text{T}} \right] / k^{2} - 2L_{\text{se}} \\ L_{\text{ac,min}} = \min \left\{ L_{\text{arm}}, 2 \left(r\tau_{\text{max}} - L_{\text{T}} \right) / k^{2} - 2L_{\text{se}}, \\ 2 \left[\sqrt{\left(\frac{E_{\text{m}}^{2}}{2I_{\text{set}}^{2}} - r^{2}\right)} / \omega^{2} - L_{\text{T}} \right] / k^{2} - 2L_{\text{se}} \end{cases}$$
(13)

其中,*L*_{ac,min}和*L*_{ac,max}分别为近交流侧电感的最小值和最大值。在近交流侧电感值确定后,则得近直流侧电感值,如式(14)所示。

$$L_{\rm dc} = L_{\rm arm} - L_{\rm ac} \tag{14}$$

3.2 分裂电感与变压器漏感参数的配合设计

故障期间,限流电感由近交流侧电感和串联变 压器漏感组成。因此,在参数设计过程中,二者的参 数还需进行配合设计。结合式(13),在其他参数确定 后,近交流侧电感值与串联变压器漏感值线性相关。 为达到限流要求,参数设计的配合与选取范围如图5 中阴影部分所示。图中,*L*_{r,max}、*L*_{r,min}分别为串联变压 器漏感参数设计过程中可选取的最大值和最小值。

通过L_{ac}与L_r参数的配合,可以实现限流参数的



优化设计。一方面,近交流侧电感的接入可以降低

串联变压器的制造难度;另一方面,漏感参数的配合 使得近交流侧电感的取值不超过桥臂电感,满足限 流式MMC-UPFC拓扑结构的需要。

4 仿真分析与验证

在PSCAD/EMTDC软件中搭建如图1所示的限 流式MMC-UPFC模型,进行稳态运行与故障限流的 仿真分析,仿真系统的主要参数见附录中表A1。

4.1 正常工况下潮流调节仿真

在系统运行正常工况下,基于分裂电感的限流 式 MMC-UPFC 承担着线路潮流调节的任务。设定 线路无功功率指令值为0,有功功率指令值初始设 为2×10³ MW,在t=2.0 s处阶跃变为1.65×10³ MW, 交流线路的潮流调节曲线与直流侧电压波形如附录 中图 A1 所示。当功率指令发生变化时,交流线路潮 流能够较好地跟随指令值并达到稳定状态,在有功 功率参考值发生阶跃时,无功功率与直流电压存在 轻微波动,很快趋于平稳,基本维持在参考值附近。

4.2 故障工况下短路限流仿真

以三相短路故障为例进行故障工况下限流式 MMC-UPFC限流能力的验证与分析。设置*t*=4 s时, 系统发生三相短路故障,故障点位置如图1所示。串 联侧 MMC 子模块迅速闭锁,在常规式 MMC-UPFC 中,通过TBS动作,将串联变压器阀侧短接,线路故障 电流如图6所示。在限流式 MMC-UPFC 中,经TBS 闭合动作,MMC上、下桥臂中近交流侧电感与变压 器漏抗串联接入故障电流回路,线路故障电流如图 7所示,串联侧 MMC 分裂电感电流波形如图8所示。







120

图 7 限流式 MMC-UPFC 三相短路电流波形







Fig.8 Waveforms of MMC-UPFC split inductor current

由图6可知,在常规式MMC-UPFC接入线路发 生三相短路故障时,短路电流最大峰值达到78kA, 故障电流中交流稳态分量接近60kA,给串联变压器 的抗短路能力和断路器的正常开断带来一定的挑 战。由图7可知,由于近交流侧电感的串联接入,短 路电流最大峰值低于55kA,交流稳态分量在40kA 内,故障电流得到了有效限制。

由图 8 可知,由于串联侧子模块的闭锁及 TBS 的闭合动作,近直流侧电感电流 i_{Lde}迅速下降至0,表 示该限流式 UPFC 拓扑在故障限流阶段,短路电流 不流经 IGBT 器件,实现了串联侧 MMC 及整个 UPFC 装置的有效保护;在故障限流阶段,近交流侧电感电 流 i_{Lae} 近似为线路三相短路电流的 1/2。由于 MMC 桥臂的对称设置,上、下桥臂近交流侧电感并联接入 故障回路进行限流,单个近交流侧电感所需承受的 电流冲击较小。

图9为UPFC系统暂态电压波形,包括近交流侧 电感电压 u_{Lac}、近直流侧电感电压 u_{Lde} 和直流侧电压 U_{de} 波形。由图9可知,在短路故障发生瞬间,由于 短路回路中电流突然增大,在近交流侧电感与近直 流侧电感均产生一个较大的电压尖峰,同时,由于交 流馈流的充能作用,直流侧电压出现一定幅度的上 升;在TBS闭合时刻,串联换流器被旁路,近直流侧 电感电流被阻断,出现第二个电压尖峰,而近交流侧 电感仍有短路电流流过,电感电压较大,直流侧电压 逐渐恢复至额定值;交流断路器动作后,短路电流与 近交流侧电感电压均下降至0。事实上,由于短路 瞬间对系统造成的暂态冲击通常不可避免,在实际 工程中,跨接避雷器的应用可以在一定程度上减小 过电压对感性元件造成的冲击。



Fig.9 Waveform of UPFC transient voltage

4.3 限流能力的讨论

在4.2节的仿真算例中,由于考虑到限制后的短路电流值与继电保护整定值的配合,保证断路器的顺利开断与故障隔离,近交流侧电感值与串联变压器漏抗值并未选取过大。在更高的限流需求下,可以结合系统参数,对限流式MMC-UPFC拓扑结构的限流能力展开进一步讨论。

4.3.1 分裂电感参数优化对限流能力的影响

不同于串联变压器漏抗值的设计,需要综合考 虑绝缘水平以及过励磁水平等因素,近交流侧电感 参数的选取具有较大的主动性以及灵活性。在允许 的范围内适当地增大 *L*_{ac}/*L*_{am},即通过分裂电感参数 的优化设计,该拓扑的限流能力能够得到进一步的 提升。

4.3.2 串联变压器变比对限流能力的影响

在限流阶段,阀侧电抗值经串联变压器耦合至 网侧,接入故障回路。限流电抗等效值的本质为折 合至网侧的反射值。因此,在k>1的应用场合下,该 拓扑的限流能力将进一步提升。

以南京西环网 UPFC 工程为例,其串联变压器 的变比为 k=26.5 kV/20.8 kV>1,则由阀侧耦合至 网侧的限流电抗等效值将进一步增大。

4.3.3 限流电阻对限流能力的影响

若通过参数优化仍不能满足限流需求,可以通 过在TBS与接地点之间设置一个小电阻,在故障限

80-86

流阶段,随着TBS的闭合,串联接入短路电流回路, 以满足更高的限流需求。

事实上,由于新型限流式MMC-UPFC 拓扑在故 障限流阶段,串联换流器已处于旁路状态,因此,经 限流后的短路电流虽然未下降至很低的水平,但并 不会对系统设备造成过流影响。针对 UPFC 串联侧 的短路保护问题,不仅仅需要考虑将短路电流降低 至安全水平范围内,还应当将参数优化与系统继电 保护原理相配合。

5 结论

当 MMC-UPFC 所接入的交流系统发生短路故障时,线路故障电流迅速上升,UPFC 串联侧将面临 大电流冲击风险,设备安全受到严重危害。

(1)基于分裂电感的限流式 MMC-UPFC 拓扑结构,通过 MMC 桥臂电感一分为二的设计和 TBS 配置空间的调整,短路故障发生后,通过 IGBT 触发脉冲的封锁与 TBS 的迅速闭合,一方面能够保证设备的快速保护,另一方面,近交流侧电感与串联变压器漏感串联接入故障电流回路,通过电感参数的优化设计,使短路电流得到有效限制的同时,与继电保护动作相配合,提高断路器动作的可靠性。此外,与桥式固态限流器模块方案相比,该拓扑结构所需要的电力电子器件较少,在减少开关损耗、降低设备和用地成本的同时,也增大了限流措施的可靠性;与常规式MMC-UPFC 拓扑结构相比,该新型结构可以在一定程度上降低串联变压器的漏抗设计值,从而减少变压器的运行成本与占地面积。

(2)PSCAD/EMTDC仿真结果表明:所提出的基于分裂电感的限流式UPFC拓扑结构在正常工况下能够实现线路潮流分布的显著改善;在故障工况下能够在有效限制故障电流的同时,保证设备安全,其适用性与有效性得到验证。

(3)所提出的限流式 MMC-UPFC 拓扑结构的不 足主要有:同常规式 MMC-UPFC 拓扑结构相比,增 加了三组晶闸管旁路开关的配置;与常规式 MMC-UPFC 拓扑结构相同,2种方案均面临由 TBS 闭合对 感性元件造成的冲击问题。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] CAI H,QI W,HUANG J,et al. Application of flexible alternatingcurrent transmission system in Jiangsu power grid [C] //Electrical Power and Energy Conference. Saskatoon, SK, Canada: IEEE, 2017:1-5.
- [2]马朋,刘青,邹家平,等.UPFC有功控制引起的交互影响研究
 [J].电力自动化设备,2017,37(1):176-181.
 MA Peng,LIU Qing,ZOU Jiaping, et al. Research on interaction during active power-flow control of UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(1):176-181.

- [3] ARUN K R K,SINGH S P. Congestion mitigation using UPFC
 [J]. IET Generation Transmission & Distribution,2016,10(10): 2433-2442.
- [4] 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.
- [5] 钱臻,刘建坤,陈静,等. 计及风电不确定性的含UPFC电力系统的两阶段最优潮流[J]. 电力自动化设备,2017,37(3): 80-86.
 QIAN Zhen, LIU Jiankun, CHEN Jing, et al. Two-stage OPF considering wind-power uncertainty for power system with UP-FC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3):
- [6] 丁然,梅军,赵剑锋,等.基于正交虚拟矢量的单相MMC系统 环流抑制方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):45-51.
 DING Ran, MEI Jun, ZHAO Jianfeng, et al. Orthogonal virtual vector based circulating current reducing method for singlephase MMC system [J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(8):45-51.
- [7] ZHOU Y, JIANG D Z, YIN R, et al. An improved topology of unified power flow controller based on MMC with fault current limiting [C] // International Conference on Power Electronics, Machines and Drives. Glasgow, UK: IET, 2016:6.
- [8] 陈峰,江道灼,周洋,等.基于故障电流控制的新型UPFC-FCL 设计[J].电力自动化设备,2015,35(12):145-150.
 CHEN Feng, JIANG Daozhuo, ZHOU Yang, et al. Design of UPFC-FCL based on fault current control[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):145-150.
- [9] 桂帆,江道灼,吕文韬,等.限流式统一潮流控制器参数设计及 优化[J].电力自动化设备,2013,33(11):160-164.
 GUI Fan, JIANG Daozhuo, LÜ Wentao, et al. Parameter design and optimization of unified power flow controller with fault current limiting[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):160-164.
- [10] 徐帅,杜钦君,张晓飞,等.新型限流式统一潮流控制器限流分析与参数设计[J]. 电网技术,2017,41(2):558-565.
 XU Shuai, DU Qinjun, ZHANG Xiaofei, et al. Current limiting analysis and parameters design of a novel UPFC with fault current limiter[J]. Power System Technology, 2017,41(2): 558-565.
- [11] 帅智康,姚鹏,涂春鸣,等. 一种新型多功能电力电子限流器的 工作机理及仿真分析[J]. 电力系统自动化,2014,38(23): 85-90.

SHUAI Zhikang, YAO Peng, TU Chunming, et al. Mechanism and simulation analysis of a novel multi-functional power electronic current limiter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23):85-90.

- [12] 张晚英,周辉,胡雪峰,等.新型饱和铁心高温超导限流器的实验研究[J].中国电机工程学报,2015,35(2):494-501.
 ZHANG Wanying,ZHOU Hui,HU Xuefeng, et al. Experimental research on a novel saturated core high temperature superconducting fault current limiter[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(2):494-501.
- [13] 杨林,蔡晖,汪惟源,等. 500 kV统一潮流控制器在苏州南部电网的工程应用[J]. 中国电力,2018,51(2):47-53.
 YANG Lin, CAI Hui, WANG Weiyuan, et al. Application of 500 kV UPFC in Suzhou southern power grid [J]. Electric Power,2018,51(2):47-53.
- [14] 李鹏,林金娇,孔祥平. 统一潮流控制器在苏南 500 kV 电网中的应用[J]. 电力工程技术,2017,36(1):20-24.
 LI Peng, LIN Jinjiao, KONG Xiangping. Application of UPFC

in the 500 kV southern power grid of Suzhou[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 20-24.

- [15] 刘黎明,康勇,陈坚,等. UPFC的交叉耦合控制及潮流调节能力分析[J]. 中国电机工程学报,2007,27(10):42-48.
 LIU Liming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Cross coupling control scheme and performance analysis for power flow control of UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 42-48.
- [16] 刘普,王跃,雷万钧,等. 模块化多电平变流器桥臂电感参数设计[J]. 电网技术,2015,39(6):1665-1671.
 LIU Pu, WANG Yue, LEI Wanjun, et al. Parameter designing of arm reactor for modular multilevel converter [J]. Power System Technology,2015,39(6):1665-1671.

作者简介:



梅 军(1971—),男,江苏淮安人,副教 授,博士,主要研究方向为柔性交流输电、柔 性直流输配电技术等(E-mail:mei_jun@seu. edu.cn);

何梦雪(1994—), 女, 福建福州人, 硕 士研究生, 主要研究方向为柔性交流输电技 术(**E-mail**: careenstrive@126.com):

王 创(1992—),男,江苏扬州人,硕士研究生,主要研 究方向为柔性交流输电技术(E-mail:651547890@qq.com)。

Current-limiting MMC-UPFC based on split inductor

MEI Jun¹, HE Mengxue¹, WANG Chuang¹, LIU Jiankun², LI Peng²

(1. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to reduce the risk of large-current shocks caused by AC system short circuit faults to MMC-UPFC(Unified Power Flow Controller based on Modular Multilevel Converter) and ensure the safe operation of power electronic equipment, a novel current-limiting UPFC-MMC topology based on split inductors is proposed. Through the split design of the bridge arm inductance and the space configuration adjustment of the thyristor bypass switch on the valve side of the series transformer, the fast protection of the converter and the effective limitation of the fault current are realized. The current-limiting principle of this topology is elaborated, and the optimization design of key parameters is carried out. The simulation and analysis of proposed current-limit MMC-UPFC topology are carried out by PSCAD / EMTDC. The simulative results show that proposed topology has flexible power flow regulation characteristics and significant fault current limiting capability.

Key words: electric power transmission; unified power flow controller; split inductor; thyristor bypass switch; parameter design; fault current limiting

(上接第108页 continued from page 108)

Degradation charging scenarios and impacts on voltage stability of urban distribution network under "EV-road-grid" coupling

YANG Xinran, LÜ Lin, XIANG Yue, LIU Youbo, LIU Fangfang

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to evaluate the impact of static voltage stability caused by the disordered charging behavior of EVs(Electric Vehicles), a degradation charging scenario is constructed and a continuous flow model considering the behavior of EVs in a temporal and spatial context is proposed. Based on the complex network theory, a coupling system of "EV-road-grid" is built to simulate the driving path characteristics of EVs under the constraints of urban traffic network. The charging position and driving path of EVs are designed to characterize the temporal and spatial variability of charging load, then a degradation charging scenario is constructed. An improved continuous power flow model is built to search the power grid collapse state, and the voltage distribution characteristics and weak areas of power grid in critical state are analyzed. The proposed method can quantify the number of EVs admitted to the urban power grid in degradation charging scenarios, evaluate the weak areas of power grid, reconstruct and plan the regional distribution network connected with charging facilities.

Key words: electric vehicles; charging load model; "EV-road-grid" system; degradation charging scenario; continuous power flow; distribution network; voltage stability

	1	
参数/单位		数值
交流系统电压/kV		500
直流侧	电压/kV	±90
桥臂子模	块数量/个	38
桥臂电	感/mH	36
近交流侧	电感/mH	28
近直流侧电感/mH		8
串联变压器变比 k		1:1
串联变压器短路阻抗		20%
1 500 W 1 000 0 0	无功功率实际值	有功功率指令值 无功功率指令值
0.0	1.0 2.0 <i>t/s</i> (a) 交流线路潮	3.0 4. 流调节曲线
250 200		_ 直流电压实际值
$\begin{array}{ccc} 150 \\ 100 \\ 0 \\ 0 \end{array}$		直流电压指令值
-50.0	1.0 2.0	3.0 4.
	(b) 直流侧电	压波形

附录 表 A1 仿真系统主要参数 Table A1 Mainparameters of simulation system

图 A1 正常工况下 UPFC-MMC 运行波形 Fig.A1Operating waveform of UPFC-MMC under normal conditions