

智能配电网电压跌落下的电力电子变压器运行研究

袁义生, 唐 喆

(华东交通大学 电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:分析了模块化多电平电力电子变压器(MMC-PET)在配电网电压跌落故障下的几种工作模式,指出了可以利用中压母线电容和低压母线电容的储能来维持逆变输出电压稳定。为了延长维持时间,提出了变模块化多电平换流器(MMC)子模块结构的故障工作模式,使得MMC子模块电容也可用于拓展维持时间。阐述了各母线电容和子模块电容的设计方法,以及它们与维持时间的关系。针对变MMC子模块结构在故障运行过程中出现的输入侧低频电流振荡现象,提出了在配电网侧加入对地电阻和电感的策略,并推导了设计方法。对一个10 kV输入/380 V输出的配电网MMC-PET进行仿真测试,采用了所提的控制模式后,逆变输出电压在电网电压跌落后能够维持0.7 s,并且不产生输入侧低频振荡现象,证明了所提方法的有效性。

关键词:配电网;电力电子变压器;模块化多电平换流器;电压跌落;维持时间

中图分类号:TM 46;TM 41

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.007

0 引言

模块化多电平电力电子变压器(MMC-PET)是一种采用电力电子器件和高频变压器构成的新型变压器,相比于传统变压器,其体积、重量都大幅减小。用它替代传统配电变压器既可提高电网的智能化水平,也可作为能源互联网中的能量路由器实现电能

在多源、多负荷之间的传输及变换。

对于电力电子变压器(PET)在电网中的应用研究,可以分为以下4种。对于新型器件的应用研究,文献[1]成功采用15 kV的SiC IGBT和10 kV的SiC MOSFET研发了一款13.8 kV输入、480 V输出的适用于配电网的PET。对于电路结构的研究,文献[2]比较了PET中前级电路分别采用级联H桥(CHB)结构和模块化多电平换流器(MMC)结构的特点,指出多端口的系统更适合采用MMC结构;而在同样的高压场合下,MMC结构使用的开关管数量会是CHB结构的2倍。文献[3]则提出了隔离级采用半桥LLC谐振变换器的配电用PET,仿真实现了系统功能。对于在各类微电网中应用的研究,文献[4-6]分别研究了PET应用于直流微电网、交直流混合微电网和高压微电网中的控制问题,主要着重于分析并网和离网下PET采用的不同的控制方法。对于PET在配电网中的应用研究,配电网的工况没有微电网那么复杂,PET的输入和输出比较稳定,文献[7]较系统地阐述了MMC-PET的输入级、隔离级和输出级的控制方法,并进行了仿真验证。文献

[8]制作了一个输入为600 V的PET样机,验证了系统的基本功能,但其输入级只是普通的三相脉宽调制(PWM)整流电路。文献[9]则较完整地对配电PET在稳态、负荷变动和电网故障下的工作情况进行了仿真分析,指出了在电网短路时PET具有一定的故障隔离能力。然而,文献[9]采用的PET前级电路也是普通的三相PWM整流电路,没有使用MMC,也没有深入分析该现象及提出改善方法。当电网出现电压跌落故障时,会要求分布式电源具有一定的维持输出的能力,比如并网的光伏发电设备^[10]和风力发电^[11]系统都要求具备低电压穿越能力,这是从发电的源头实现电网电压跌落下的安全运行。作为配电网环节之一的PET,应深入研究其在电网电压跌落时的故障隔离能力及输出电压维持能力。

本文分析了MMC-PET在配电网电压跌落故障下的几种工作模式,提出并分析了变MMC子模块结构的故障工作模式,延长了输出电压的稳定时间。搭建了10 kV的MMC-PET仿真模型,验证了在新的工作模式下系统能更好地维持输出电压稳定。针对故障模式下新出现的输入电流低频振荡现象,提出了一种防过流装置,分析其设计方法,并通过实验验证了其能够有效地抑制该电流低频振荡现象。

1 MMC-PET 基本原理

1.1 MMC-PET 拓扑结构

MMC-PET拓扑如图1所示。输入级MMC将输入三相电压 u_a 、 u_b 、 u_c 转换成一个直流中压 U_M ,经各个中压电容 C_M 分压后供给隔离级-双有源桥变换器(简称DABC),再由DABC转换成直流低压 U_L ,最后经四桥臂三相逆变器转换成三相380 V交流电供负载使用。实际负载不仅有电阻性负载,还有非线性的整流电路负载、阻感性负载等。但由于PET中

收稿日期:2018-04-04;修回日期:2018-11-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51467005);江西省自然科学基金资助项目(20181BAB206033)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51467005) and the Natural Science Foundation of Jiangxi Province(20181BAB206033)

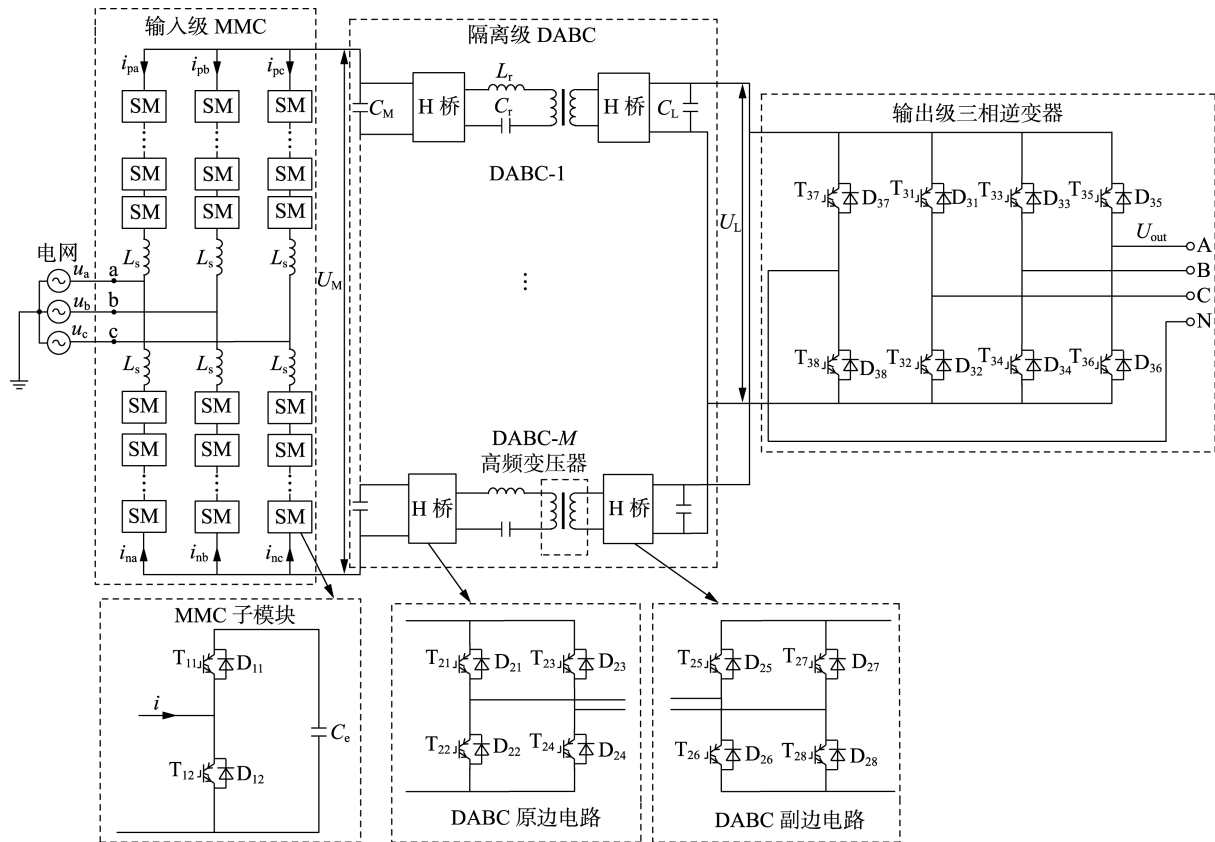


图1 MMC-PET 拓扑

Fig.1 Topology of MMC-PET

有储能电容 C_L 构成的低压直流环节,非阻性负载所需要的无功由 C_L 提供,从而增加了 U_L 的纹波电压。DABC 起到了将负载无功与配电网侧隔离的作用,这也是 PET 应用上的一大优点,所以下文假定负载为阻性进行分析。

1.2 MMC-PET 控制方法

MMC 可实现功率因数校正和交直流转换的功能,采用基于 dq 变换的定中压直流电压双环解耦控制策略,调制策略选取的是最近电平逼近的方法,并采用工程中应用较多的电压电容排序算法^[12]。

隔离级 M 个 DABC 采用的是输入串联、输出并联的连接方式,各个 DABC 对应位置的功率管触发脉冲同相位。假设各中压电容 C_M 电压不均衡,电压越高的电容输出功率(输出电流)就越大,而串联的各个 C_M 输入充电电流一样,电压偏高的电容电压就会下降,反之亦然,从而实现中压母线电容 C_M 电压的自动均衡。

输出级三相逆变器采用 3 次谐波注入式正弦脉宽调制方法^[13],这里不再赘述。

2 配电网电压跌落时 MMC-PET 工作模式

2.1 3 种工作模式

当使用传统工频变压器时,输出电压随输入电压同步变化,在电网电压跌落时,无法维持输出电压

品质。当使用 MMC-PET,电网电压跌落至 0 时,可以有 3 种工作模式。模式 1:检测到配电网电压跌落到超出 MMC-PET 输入范围时,整体关机保护。这将切断输出电源,后果比传统变压器还严重,不能满足智能配电网的需求。模式 2:MMC-PET 随配电网电压跌落仍旧保持工作状态,但其逆变输出将随配电网电压的跌落而跌落,这与传统变压器的效果一样。模式 3:检测到配电网电压跌落到超出 MMC-PET 输入范围时,前级 MMC 停止工作,但隔离级和逆变级电路仍继续工作,保持输出电压。

模式 3 实际是依靠直流母线电容 C_M 和 C_L 的储能释放来维持输出负载所需能量。若隔离级采用开环控制,可以认为模式 3 中 C_M 和 C_L 的电压能维持恒定比例变化,将 C_M 折算至低压直流母线侧后为 C_{MD} 。忽略系统损耗,输出三相电压维持时间 t_h 满足:

$$t_h = \frac{1}{2P_o} (C_{MD} + C_L) (U_L^2 - U_{L-\min}^2) \quad (1)$$

其中, $U_{L-\min}$ 为 C_L 放电后能维持输出三相电压幅值不变的最小直流低压母线电压; U_L 为 C_L 放电前的电压; P_o 为负载功率。可见,维持时间 t_h 取决于电容值 C_L 、 C_{MD} 以及设定低压母线电压值 U_L 。理论上这 3 个参数越大,维持时间 t_h 越长。

2.2 含储能环节的 MMC-PET 故障工作模式

当 MMC-PET 中需要加入蓄电池或超级电容等

储能环节时,考虑到电压等级不宜过高,一般是加在低压母线侧,再经过双向 DC-DC 变换器接到低压直流母线 U_L 上,如图 2 所示。当配电网电压跌落时,此类系统最宜采用的模式是停止 MMC 和 DABC 的工作,而让电池或超级电容升压给 C_L 供电,维持 U_L 不变,从而维持三相输出电压稳定。维持时间取决于储能容量和负载功率的大小。

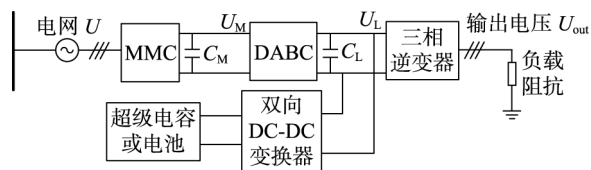


图 2 含储能环节的 MMC-PET

Fig.2 MMC-PET with energy storage element

3 配电网电压跌落时 MMC-PET 的变结构运行

3.1 变结构工作模式

在模式 3 的基础上,如果还能利用 MMC 各子模块中的电容 C_e ,在电网电压跌落时将其电能转移到输出侧,就可以再延长维持时间 t_h 。

由图 1 所示的 MMC 子模块电路可知,当 MMC 正常工作时,开关管 T_{11} 和 T_{12} 为 PWM 开关状态。如果在电网电压跌落时,令 T_{11} 常通、 T_{12} 常断,则各子模块电容 C_e 首尾相连,串联成一个总的直流母线电容 $2C_e/(3N)$, N 为 MMC 子模块数。 $2C_e/(3N)$ 与 C_M 并联,增加了中压直流母线上的储能。根据式(1),这就增加了电网电压跌落时输出电压的维持时间 t_h 。

3.2 设计与仿真

3.2.1 各电容的设计^[14]

a. MMC 子模块电容 C_e 的选取。

MMC 子模块电容 C_e 的电压随电流的充放电而波动,依据式(2)进行设计。

$$C_e = \frac{P_s}{3k\lambda N\omega U_c^2} \left[1 - \left(\frac{k\cos\delta}{2} \right)^2 \right] \quad (2)$$

其中, P_s 为系统功率; k 为电压调制比; λ 为子模块电容电压百分比; δ 为功率角; ω 为工频角频率; U_c 为电容电压。

b. 中压母线电容 C_M 的设计^[15]。

C_M 的取值在确保 U_M 能够快速地跟踪控制的同时,还要限制负载侧扰动时 U_M 的动态降落,故有:

$$\frac{1}{2\Delta V_m R_e} < C_M \leq \frac{t_r}{0.74 R_e} \quad (3)$$

其中, t_r 为直流电压以初始值跃变为额定直流电压 U_{dc} 时的上升时间; R_e 为负载等效电阻; ΔV_m 为中压母线电压最大动态降落的相对值。

c. 低压母线电容 C_L 的设计。

C_L 的设计方法与 C_M 一样,不再赘述。

3.2.2 仿真分析

MMC-PET 在配电网电压跌落时变结构运行的仿真参数见附录。设置在 0.7 s 时电网电压跌落至 0,故障持续时间为 0.7 s。1.4 s 时电网电压恢复至 1 p.u.。在故障发生 0.3 s 后(即 1 s 时),MMC-PET 进入变结构运行模式。MMC-PET 各相输入电压 u_a 、 u_b 、 u_c ,各相输入电流 i_a 、 i_b 、 i_c ,中压母线电压 U_M ,低压母线电压 U_L ,逆变器输出电压 U_{out} ,a 相上桥臂各子模块电容电压 U_{aup} 的仿真结果如图 3 所示。

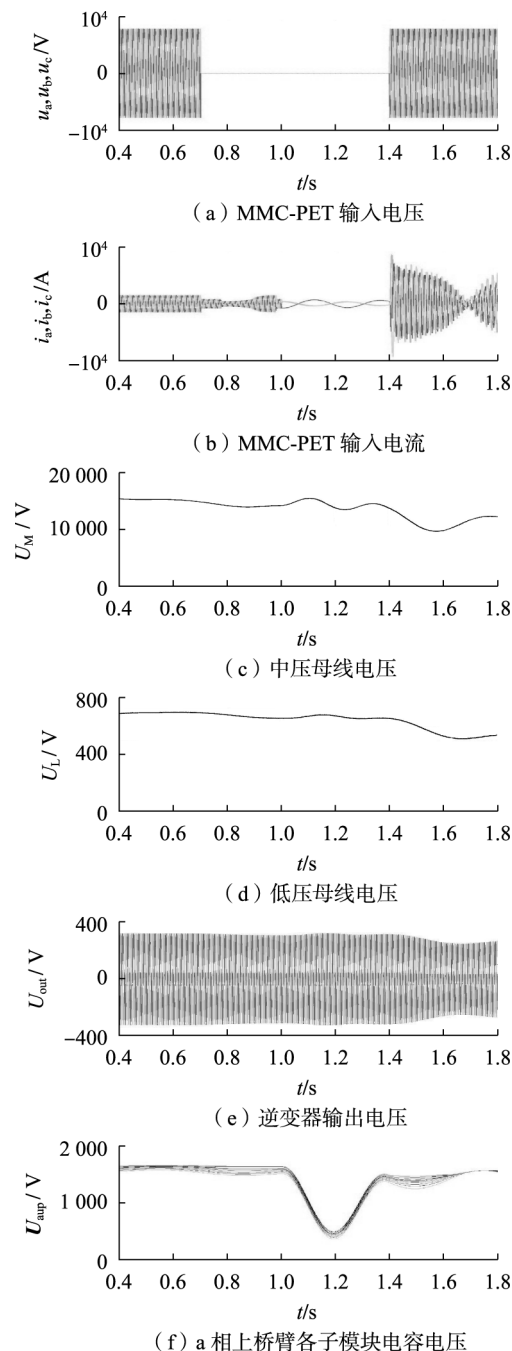


图 3 仿真结果

Fig.3 Simulative results

从图 3(e) 中可以看出,逆变器输出电压从 0.7 s 开始跌落,但在 1 s 时维持稳定,这是由 MMC 变结

构运行后各子模块电容 C_e 开始放电所致。在 1.12 s 时输出电压继续下降,这是由于各子模块电容 C_e 电压下降到其折算值小于 $U_{L\min}$ 。在 1.4 s 左右时输出电压下降到约为 0.95 p.u., 在 1.4 s 之后输出电压并未上升而是继续下降,这是因为子模块电容 C_e 正在充电,在 1.6 s 后输出电压恢复正常。实际应用中,考虑到器件损耗,输出电压的维持时间会有所下降。但大功率的 PET 效率很高,此时前级 MMC 的 IGBT 又没有开关损耗,系统的效率一般能达 95% 以上^[1],对维持时间的影响有限。从图 3(b) 中也可以看出,在 1 s 时切换控制后会在 MMC-PET 输入侧引起低频电流振荡,频率约为工频的 1/5,这会电网带来低频冲击,影响功率的正常传输。在 1.4 s 时,MMC 切换回最近电平逼近控制后,也会引起输入电流振荡,对系统造成冲击。这是因为各子模块电容 C_e 放电导致电压 U_M 低于配电网电压恢复时的电压,电网直接对各个电容 C_e 充电。

4 改进的 MMC-PET 结构与实验分析

为了消除 MMC-PET 在电网故障时变结构运行模式中出现的输入端低频电流振荡现象,在 MMC 三相输入侧加入接地变压器 T_{X1} 以及电阻 R_0 和电感 L_0 的防过流装置,如图 4 中虚框所示。该装置在故障发生后 MMC-PET 进入变结构工作模式时接入系统,在电网电压恢复正常后再从系统中断开。故障模式下含防过流装置的 MMC-PET 如图 4 所示。图中, C_e/N 为各桥臂等效串联电容; C_M/M 为 M 个串联的 C_M 的等效电容; R_s 为桥臂电阻; L_s 为桥臂电感。在故障运行模式下, R_0 、 L_0 与上述电感、电容和电阻及 R_e 构成了一个谐振回路。

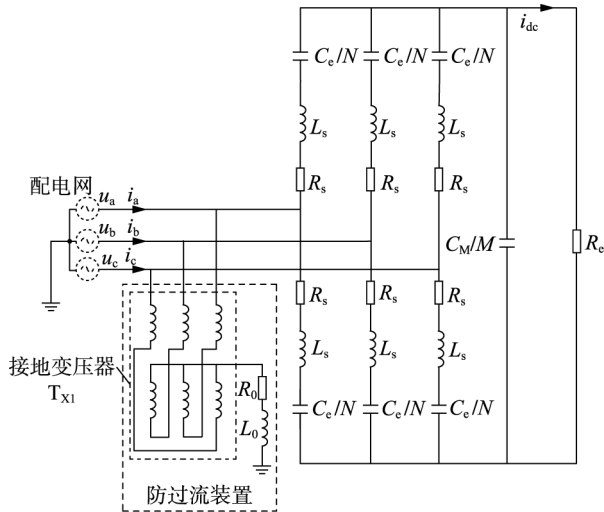


图4 故障模式下含防过流装置的 MMC-PET

Fig.4 MMC-PET with anti-overcurrent device in fault mode

图 5 中左图为故障时的电流回路,右图为简化等效电路。各等效参数如下:

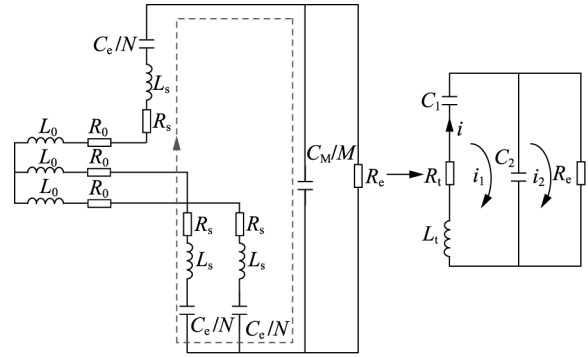


图5 故障模式下输入侧等效电路

Fig.5 Equivalent circuit at input side in fault mode

$$\begin{cases} C_1 = \frac{2C_e}{3N}, C_2 = \frac{C_M}{M} \\ L_t = \frac{3L_s}{2} + \frac{3L_0}{2}, R_t = \frac{3R_s}{2} + \frac{3R_0}{2} \end{cases} \quad (4)$$

根据网孔电流法,列出图 5 所示电路的状态方程为:

$$\begin{cases} i_1(s) \left(sL_t + R_t + \frac{1}{sC_1} + \frac{1}{sC_2} \right) - i_2(s) \frac{1}{sC_1} = \frac{3L_s i_j}{2} - \frac{2u_{dc}}{s} \\ -i_1(s) \frac{1}{sC_1} + i_2(s) \left(\frac{1}{sC_2} + R_e \right) = \frac{u_{dc}}{s} \end{cases} \quad (5)$$

其中, u_{dc} 为 C_1 、 C_2 上的初始电压; i_{dc} 为 C_M/M 的输出电流; $R_e = u_{dc}/i_{dc}$; i_j 为 L_s 上的初始电流; i_1 为要求的交流侧电流 i ,但求解的结果过于复杂。下面结合故障恢复后的状态进一步分析。

当故障恢复 MMC 切回正常工作状态时,由于 U_L 降低到小于电网电压值,配电网侧会产生冲击振荡电流。为了减小这个时刻对电网的冲击,图 5 所示的等效电路中,串联的 L_0 和 L_s 与电容 C_e/N 应构成一个工频的串联谐振回路,使 L_0 和 L_s 中剩余的能量能够以最大电流形式转移到 C_e/N 中,从而减小来自网侧的电流。因此,防过流装置中电感 L_0 的选择公式如下:

$$L_0 = \frac{N}{C_e \omega^2} - L_s \quad (6)$$

将式(6)转换至 s 域,可得:

$$\frac{3(L_s + L_0)s}{2} + \frac{3N}{2sC_e} = 0 \quad (7)$$

根据式(5)和(7)可得输入侧电流 i 为:

$$i(s) = \frac{\frac{3L_s i_j R_e}{2} + \frac{3L_s i_j}{2sC_2} - \frac{u_{dc}}{s^2 C_2} - \frac{2u_{dc} R_e}{s}}{R_t R_e + \frac{R_t + R_e}{sC_2}} \quad (8)$$

将式(8)进行反拉普拉斯变换后得:

$$i(t) = \frac{3i_j L_s}{2R_l} \delta(t) - \frac{u_{dc}}{R_l + R_e} - \frac{2C_2 R_l^2 u_{dc} + 4C_2 R_l R_e u_{dc} + 3i_j L_s (R_l + R_e)}{2C_2 R_l^2 (R_l + R_e)} e^{-\frac{(R_l + R_e)t}{C_2 R_l R_e}} \quad (9)$$

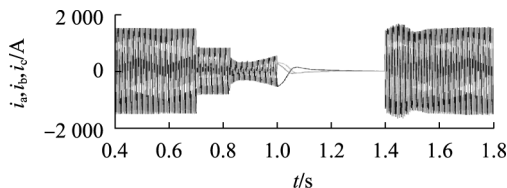
其中, $\delta(t)$ 为冲激函数。

令 $i_{\max}$ 为 $i(t)$ 的最大电流峰值, 因此很显然, R_0 和 L_0 越大, $i_{\max}$ 越小。从这方面来看, 故障运行状态下, R_0 和 L_0 要越大越好。

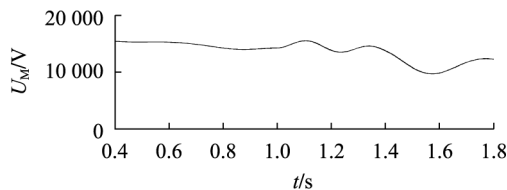
结合 $i_{\max}$ 和式(9)可以求得 R_0 为:

$$R_0 \approx \frac{u_{dc}}{i_{\max} - i_j} - R_s \quad (10)$$

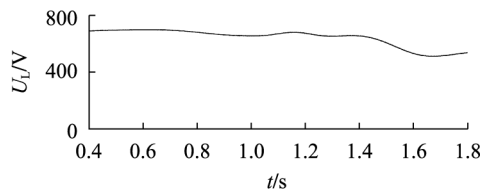
根据式(10), 设置 R_0 和 L_0 分别为 50 Ω 和 50 mH, 对改进的系统再次进行仿真。得到的仿真波形如图6所示, 0.7 s 时电网发生电压跌落故障, 1 s 时加入防过流装置, 在 1.6 s 时断开此装置。



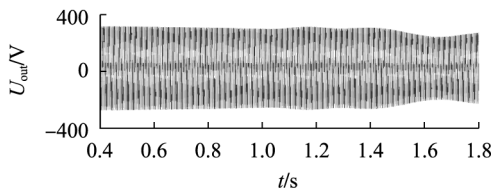
(a) MMC-PET 输入电流



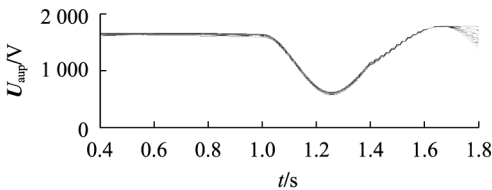
(b) 中压母线电压



(c) 低压母线电压



(d) 逆变器输出电压



(e) a 相上桥臂各子模块电容电压

图6 仿真结果

Fig.6 Simulative results

从图6(a)可见, 输入电流在电网故障后迅速衰减, 未发生之前的低频振荡现象。而且在故障恢复后, 该电流也未发生冲击振荡现象, 最高峰值从之前的约 8 400 A 下降了 1 600 A, 而且很快恢复稳定。此外, 无论是 U_M 还是 U_L 都没有受到过大的影响, 尤其是输出电压 U_{out} 一直保持在 0.9 p.u. 以上。图6(e)中子模块电容电压更加平稳, 在 1 s 时子模块电容电压跌落, 电容放电, 随后在 1.4 s 时给予模块电容充电, 直至 1.6 s 时系统恢复正常运行。

5 结论

a. 在配电网电压跌落至 0 期间, MMC-PET 相比于传统变压器可以在短时间内维持逆变输出电压稳定;

b. 采用变 MMC 结构运行模式可以将子模块电容上的储存能量用于维持逆变输出电压稳定, 延长维持时间;

c. 在配电网侧加入合适的接地电感和接地电阻, 可以抑制变 MMC 结构模式运行时配电网母线出现的电流低频振荡现象。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] MADHUSOODHANAN S, TRIPATHI A, PATEL D, et al. Solid-state transformer and MV grid tie applications enabled by 15 kV SiC IGBTs and 10 kV SiC MOSFETs based multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4): 3343-3360.
- [2] BRIZ F, LOPEZ M, RODRIGUEZ A. Modular power electronic transformers; modular multilevel converter versus cascaded H-bridge solutions [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017, 10(4): 6-19.
- [3] 陈启超, 王建勋, 纪延超. 基于 LLC 谐振变换器的电力电子变压器 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 41-46.
CHEN Qichao, WANG Jianze, JI Yanchao. Power electronic transformer based on LLC resonant converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 41-46.
- [4] 韩继业, 李勇, 曹一家, 等. 基于模块化多电平型电力电子变压器的新型直流微网架构及其控制策略 [J]. 电网技术, 2016, 40(3): 733-740.
HAN Jiye, LI Yong, CAO Yijia, et al. A new DC microgrid architecture based on MMC-SST and its control strategy [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 733-740.
- [5] 兰征, 涂春鸣, 肖凡, 等. 电力电子变压器对交直流混合微网功率控制的研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 50-57.
LAN Zheng, TU Chunming, XIAO Fan, et al. The power control of power electronic transformer in hybrid AC-DC microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 50-57.
- [6] 张明锐, 王之馨, 黎娜. 下垂控制在基于固态变压器的高压微电网中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2012, 30(14): 186-192.
ZHANG Mingrui, WANG Zhixin, LI Na. Application of droop control in high-voltage microgrid based on solid state transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 30(14): 186-192.
- [7] WANG X, LIU J, OUYANG S, et al. Control and experiment of an

- H-bridge-based three-phase three-stage modular power electronic transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 2002-2011.
- [8] 邱鹏, 孙冬梅, 嵇保健, 等. 面向智能配电网的电力电子变压器研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(1): 112-116.
- QIU Peng, SUN Dongmei, JI Baojian, et al. Research on smart distribution grid oriented power electronic transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(1): 112-116.
- [9] 廖国虎, 袁旭峰, 邱国跃. 配电网电力电子变压器仿真研究[J]. 电测与仪表, 2014(17): 35-41.
- LIAO Guohu, YUAN Xufeng, QIU Guoyue. Research on the simulation of the power electronic transformer in the distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014(17): 35-41.
- [10] 孙玲玲, 王宁, 贾清泉, 等. 计及分布式光伏发电低电压穿越能力的主动配电网保护方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 79-86.
- SUN Lingling, WANG Ning, JIA Qingquan, et al. Protection method of active distribution network considering low voltage ride-through of distributed PV generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 79-86.
- [11] 章心因, 胡敏强, 吴在军, 等. 基于 VSC-HVDC 的风力发电系统低电压穿越协调控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 138-143.
- ZHANG Xinyin, HU Minqiang, WU Zaijun, et al. Coordinated LVRT control of wind power generation system based on VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 138-143.
- [12] 李子欣, 王平, 楚遵方, 等. 面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2592-2601.
- LI Zixin, WANG Ping, CHU Zunfang, et al. Research on medium- and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2592-2601.
- [13] 陈璐瑶. 基于 MMC 的电力电子配电变压器仿真研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- CHEN Luyao. Simulation research of power electronics distribution transformer based on MMC[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [14] 周廷冬, 徐永海, 吕晓慧. 基于 MMC 的配电网电力电子变压器接地设计及故障特性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 4077-4085.
- ZHOU Tingdong, XU Yonghai, LÜ Xiaohui. Grounding design and fault characteristic analysis of MMC based power electronic transformer in distribution network[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 4077-4085.
- [15] 祝万平. 带储能系统的电力电子变压器研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- ZHU Wanping. Research on power electronic transformer with energy storage system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.

作者简介:



袁义生

袁义生(1974—),男,江西上高人,教授,博士,主要研究方向为电力电子及电力传动(E-mail: cloudstone_yuan@aliyun.com);

唐喆(1994—),男,江西抚州人,硕士研究生,主要研究方向为电子及电力传动(E-mail: 1364526102@qq.com)。

Research on PET in smart distribution network under voltage sag

YUAN Yisheng, TANG Zhe

(School of Electric Engineering and Automation, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In the case of the voltage sag fault in a distribution network, a few operating modes of the MMC-PET (Modular Multilevel Converter Power Electronic Transformer) are analyzed. Energy storage of the medium-voltage bus capacitance and the low-voltage bus capacitance can be utilized to maintain the output voltage stability of the inverter. To extend the maintenance time, variable MMC sub-module structure in the failure operating mode is proposed. As a result, the MMC sub-module capacitance can also be used to extend the maintenance time. The design approaches of each bus capacitance and sub-module capacitance are explained as well as their relationship with maintenance time. As for the input-side low-frequency current oscillations that occur during the fault operation of the variable MMC sub-module structure, the strategy that adds resistance and inductance to the ground at the distribution network side is proposed, and the design approach is deduced. The simulation test of a 10 kV input/380 V output distribution network MMC-PET is carried out. It shows that the proposed control mode ensures that the inverter output voltage can maintain 0.7 s after a voltage sag. At the same time, the low-frequency oscillation does not happen at the input side. These results validate the effectiveness of the proposed approach.

Key words: distribution network; power electronic transformer; MMC; voltage sag; maintenance time

附录

表 A1 MMC-PET 仿真模型参数

Table A1 Simulation model parameters of power electronic transformer

参数	数值
交流电网输入线电压 U/kV	10
电网电压频率/Hz	50
MMC 半桥子模块数 N	10
MMC 子模块电容值 C_e/mF	10
MMC 子模块电容电压/kV	1.6
MMC 桥臂电感 L_s/mH	10
MMC 桥臂等效电阻 R_s/Ω	1
中压侧直流侧电压 U_M/kV	16
DC-DC 变换器数 M	10
DC-DC 变换器中压侧电容电压/kV	1.6
DC-DC 变换器低压侧电容电压 U_L/V	700
低压侧逆变器输出电压有效值 U_{out}/V	220
低压侧逆变器输出电压频率/Hz	50
DC-DC 变换器中压侧电容值 $C_M/\mu\text{F}$	1000
DC-DC 变换器低压侧电容值 $C_L/\mu\text{F}$	850
高频变压器频率/kHz	2
低压侧逆变器载波频率/kHz	2
额定容量 $P/(\text{MW})$	18
逆变器负载电阻/ Ω	10