

含电力电子变压器的配电网单相接地故障集成化消弧方法

简玉婕, 郭谋发, 游建章

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:在电力电子变压器输入级变流器直流侧电容中点设置接地支路,配合 $\alpha\beta$ 坐标系下的多变量解耦控制,提出一种配电网单相接地故障集成化消弧方法,该方法具备基于0轴电压调控的配电网对地参数不对称补偿、单相接地故障选相、自适应消弧功能和基于 α 、 β 轴电压调控的源端功率平衡功能。配电网正常运行时,实时监测配电网对地参数不对称引起的中性点电位偏移,根据偏移量计算补偿电流并将其注入配电网消除中性点电位偏移。配电网发生单相接地故障时,通过对比零序电压与三相电压间的关系辨识故障相,并以零序电压幅值为投切条件实现自适应消弧;通过对源端功率的实时补偿抑制因负荷投切或故障导致的功率振荡。MATLAB/Simulink仿真结果验证了所提集成化消弧方法的可行性和有效性。

关键词:配电网;电力电子变压器;接地方式;集成化消弧;功率平衡

中图分类号:TM 71

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202201010

0 引言

单相接地故障占配电网故障总数的80%以上,且易转化为弧光接地故障^[1],持续燃烧的接地电弧会引起全系统过电压,易损坏设备,甚至引发火灾及停电^[2]。

有源(柔性)消弧技术具有可补偿接地故障电流中大幅增加的有功电流分量和谐波电流分量,提高系统的消弧能力,促使故障点电弧熄灭,有效避免接地电弧电流能量及燃弧过电压对系统绝缘造成威胁,进而引起故障扩大等优点^[3]。目前,基于电力电子技术的有源消弧方法已有一定的成果,例如:福州大学学者提出了基于配电网三相级联H桥CHB(Cascaded H-Bridge)变流器的柔性自适应消弧方法^[4];中国石油大学及山东理工大学学者提出了适应线路参数动态变化的全补偿新算法^[5];瑞典中立公司开发的接地故障综合补偿装置^[6-7],长沙理工大学^[8]、武汉大学^[9-11]等单位研发的残流全补偿装置等均已实现工程应用。采用有源电力电子装置实现配电网单相接地故障消弧已有理论支撑和应用案例,保障了其技术可行性和可靠性。

文献[12]提出一种配电网中性点经单相CHB变流器接地的有源消弧方法,其无需借助消弧线圈即可实现接地故障消弧。然而,单个CHB模块作为有源消弧装置存在耐压低、输出电平数少、谐波含量高、容量有限和直流侧电容供电困难等问题^[13-16]。文献[4,17]借鉴静止无功补偿器技术思路,提出将星

形接地的三相CHB变流器经连接电感直接挂于配电网各相线,通过分相注入补偿电流实现接地故障消弧。三相装置中各相CHB变流器独立运行,在耐压能力、输出电平数、设备容量等方面都优于单相装置,但设备造价升高。文献[4,12,17]的思路对间歇性弧光接地故障的消弧效果均不佳,对此,文献[9]提出一种基于磁控消弧线圈和有源补偿器的全补偿消弧方法,不仅降低了有源补偿器的配置容量,并且能有效阻止间歇性接地故障电弧重燃。另有广西大学、长沙理工大学、湖南大学学者联合研发的配电网接地故障相主动降压成套装置,可迅速抑制弧光重燃,避免弧光过电压及电缆火灾事故,该装置已通过性能检测并实现挂网运行^[8]。

然而,上述研究中的柔性消弧装置存在功能单一、仅能在接地故障时发挥效用、利用效率低、成本偏高等问题,若能集成其他实用功能,将更有利于推广应用。文献[18-19]基于传统三相换流器增设新的桥臂并提出新的控制策略,使其具备功率补偿、有源电力滤波、接地故障电流补偿等新功能。文献[20]在接地变压器系统侧Y形绕组的的不同位置设置分接抽头,通过调节故障相的接地抽头档位达到接地故障主动辨识、选线、消除的目的。文献[18-20]的方法虽无需增设新的消弧装置,但需对配电网已有设备进行改造才能实现多功能的目标需求,这对已投入运行的配电网和已安装并网的电力设备而言并不实际。文献[21]针对中性点经消弧线圈接地的CHB型电力电子变压器PET(Power Electronic Transformer),提出一种虚拟接地阻抗控制方法,实现PET与消弧线圈间的紧密配合及可靠消弧,并提出负序电流注入法用于增加消弧线圈的容量,但该文献未涉及利用同一PET实现消除配电网对地参数不对称、辨识接地故障相、平衡功率振荡等方面的研究。

收稿日期:2021-02-19;修回日期:2021-11-12

在线出版日期:2022-01-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677030)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677030)

PET作为一种新型电力电子设备,在电能质量控制、直流输出、故障自愈^[22]等方面均胜过传统变压器。本文从提高电力电子装备利用率、实现电气设备多场景应用角度出发,考虑配电网对地参数不对称、负荷变化、接地故障等引起的配电网电能质量变差、稳定性下降等问题^[23-24],以输入级变流器为模块化多电平换流器MMC(Modular Multilevel Converter)拓扑的PET为研究对象,提出一种配电网接地故障集成化消弧方法。在PET输入级的MMC直流侧电容中点设置接地支路,配合 $\alpha\beta 0$ 坐标系下多变量解耦控制,通过调控0轴电压实现配电网正常运行时对地参数不对称补偿以及单相接地故障下的故障相辨识和自适应消弧,调控 α 、 β 轴电压实现源端功率平衡。MATLAB/Simulink仿真结果验证了本文所提方法的有效性。

1 PET拓扑结构

1.1 整体结构

含PET的配电网拓扑结构见图1。PET的整体结构分为输入级、隔离级和输出级^[25]。PET输入级

中,MMC各子模块SM(SubModule)间紧密配合,实现10 kV交流配电网与中压直流电网间的电能互换。PET隔离级由双有源桥DAB(Dual Active Bridge)直流变换器模块组成,DAB模块包含串联H桥逆变器、高频变压器及并联H桥整流器,可实现中压直流电网与低压直流电网间的电能互换,且具有电气隔离的功能。低压直流电网经PET输出级与低压交流配电网、智能微电网或负荷实现电能互换。图1中: E_A 、 E_B 、 E_C 为三相电源电压; U_A 、 U_B 、 U_C 为三相线电压; U_{00} 为配电网正常运行时的不对称零序电压; U_0 为配电网发生单相接地故障时的零序电压; I_{AZ} 、 I_{BZ} 、 I_{CZ} 为PET输入级MMC向配电网注入的电流; I_{Ag_i} 、 I_{Bg_i} 、 I_{Cg_i} ($i=1, 2, \dots, n$)为第*i*条线路三相对地电流; I_F 为故障电流; p_i 、 q_i 分别为第*i*条线路所需有功、无功功率; R_F 为故障电阻; K_1 为PET并网开关; R_{iA} 、 R_{iB} 、 R_{iC} 和 C_{iA} 、 C_{iB} 、 C_{iC} 分别为第*i*条线路的三相对地电阻和三相对地电容; C_X 为MMC直流侧接地电容; L_{arm} 为桥臂电感; L_{se} 为连接电感; C_1 和 C_2 分别为DAB模块的均压电容和平波电容; N 为MMC半桥臂中SM数量。

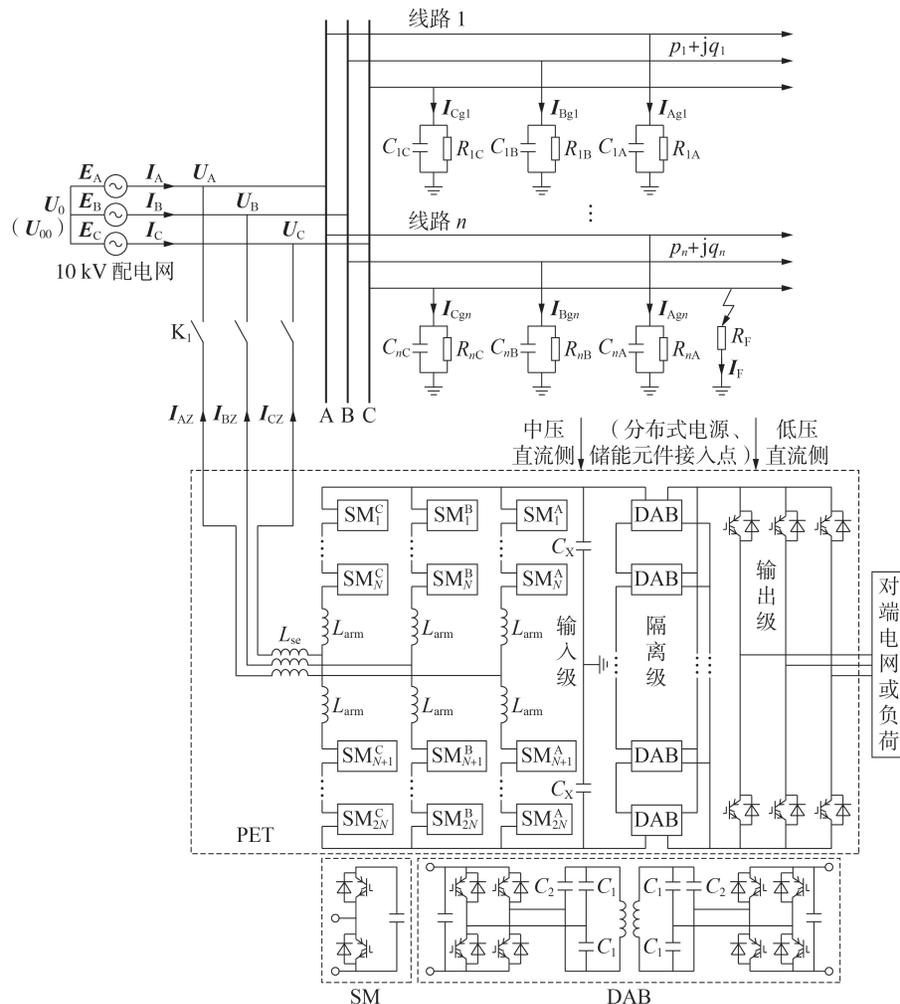


图1 含PET的配电网拓扑结构图

Fig.1 Topology of distribution network with PET

1.2 接地点设置

与10 kV配电网相连的PET输入级MMC(以下进行分析时简称MMC)是本文的主要控制对象。MMC的电路拓扑中无接地点不仅会造成设备安全隐患,且阻断了零序电流通路,导致消弧功能无法实现,因而设置MMC接地点是必要的。MMC直流侧接地方式可分为经箝位电阻中点接地和经直流侧电容中点接地2种。经箝位电阻中点接地需采用千欧乃至兆欧级别阻值的电阻,几乎阻断了零序电流通路;经直流电容中点接地可能改变正常运行配电网的小电流接地性质,需控制MMC对地(零序)电流以保证配电网接地性质不变。由图1可知,本文中PET采用MMC经直流侧接地电容中点接地的方式运行,10 kV配电网发生单相接地故障后,MMC向故障电网注入零序补偿电流,其能量来源于分布式电源或储能元件(从PET中压直流侧或低压直流侧接入)。分布式电源和储能元件的接入使PET实现故障消弧的同时,保持对其所带低压侧电网或负荷的正常能量供应。配电网发生单相接地故障时零序电流通路如图2所示。由图可知,补偿电流(实线箭头)来源于PET,经配电网流向故障线路,抵消故障线路流向故障点的零序电流(带方块实线箭头)及配电网各线路流向故障点的零序电流(虚线箭头),实现单相接地故障消弧。

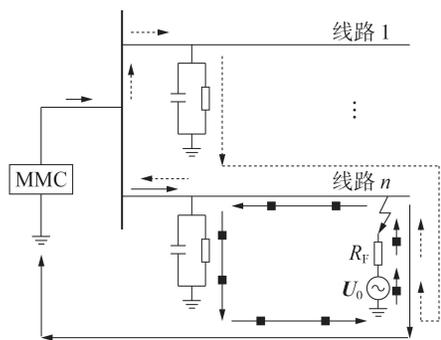


图2 配电网发生单相接地故障时的零序通路

Fig.2 Zero-sequence path under single-phase grounding fault of distribution network

2 原理分析

2.1 系统的零序通路

利用有源电力电子装置实现小电流接地系统单相接地故障消弧的前提是装置与配电网间存在零序电流通路。本文将MMC直流侧电容中点接地,构建装置与配电网间的零序通路。根据戴维南定理和诺顿定理对MMC工作电路进行简化,如附录A图A1所示。已知MMC与10 kV配电网间交换的能量实际来源于其中压直流侧或低压直流侧电网接入的分布式电源或储能元件,为便于分析,图A1中将MMC等效为内阻抗为 Z_p 、输出电流为 $-I_{z0}$ 的对地电流源,

其中 I_{z0} 为MMC向配电网注入的三相电流总和,即 $I_{z0}=I_{AZ}+I_{BZ}+I_{CZ}$; Z_p 如式(1)所示。

$$Z_p = \frac{1}{j\omega C_p} + j\omega L_p \quad (1)$$

式中: C_p 、 L_p 分别为MMC等效电容和等效电感; ω 为配电网基波角频率。

由于MMC存在直流电容, C_p 远大于一般线路对地电容, L_p 近似于一般线路对地电感,则 Z_p 远小于一般线路对地阻抗。

假设配电网发生A相接地故障,此时配电网的三相等效电路如图3(a)所示。图中, Y_A 、 Y_B 、 Y_C 为配电网三相对地导纳。列出图3(a)中节点D的基尔霍夫电流定律(KCL)方程为:

$$\begin{aligned} I_{z0} &= I_{AZ} + I_{BZ} + I_{CZ} = \\ & I_F + Y_A U_A + Y_B U_B + Y_C U_C = \\ & I_F + Y U_0 + Y_A E_A + Y_B E_B + Y_C E_C \end{aligned} \quad (2)$$

式中: Y 为配电网总对地导纳, $Y=Y_A+Y_B+Y_C$ 。假设 $Y_A=Y_B=Y_C$,即 $Y_A E_A + Y_B E_B + Y_C E_C = 0$,得到配电网发生A相接地故障时的零序等效电路如图3(b)所示。发生金属性接地故障时 $R_F=0$,此时若不控制MMC的对地电流,则认为图3(b)中的可控电流源开路, $I_{z0}=-U_0/Z_p$,MMC等效于挂接在配电网的一条对地电阻为 Z_p 的线路, I_F 如式(3)所示。

$$I_F = -U_0(Y + 1/Z_p) \quad (3)$$

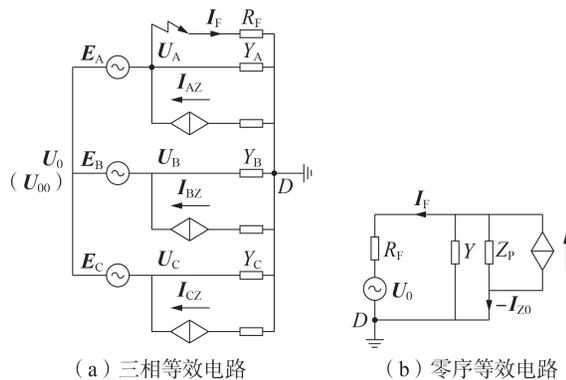


图3 配电网A相接地故障等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit of distribution network with phase-A grounding fault

由 C_p 、 L_p 特点可知, Z_p 取值减小,会引起单相接地故障时 I_F 增大,极端情况下增幅可达十数倍。若控制 I_{z0} 大小,使MMC等效为可控电流源,通过大地与故障配电网形成回路,则当 $I_{z0}=Y_A U_A + Y_B U_B + Y_C U_C$ 时, $I_F=0$ 。

综上所述,本文中MMC采用经直流侧电容中点接地的方式运行,通过控制MMC对地电流,不仅能有效避免配电网发生单相接地故障时 I_F 突增,还能实现故障消弧。未执行消弧时,此种拓扑结构的PET还可实现其他功能集成,包括配电网对地参数不对称补偿、对地参数测量和故障选相等,此时

MMC对地电流小且可控,不会改变系统小电流接地的性质。此外,PET可作为配电网中的“能量路由器”^[26],在其中压直流侧或低压直流侧接入分布式电源或储能元件,可保障其对被补偿电网及所带负荷进行正常能量供应,且PET本身具备电气隔离功能,因而对其MMC的功能复用不影响副边电网的正常运行。

2.2 配电网对地参数不对称补偿原理

实际配电网中存在三相对地参数不对称现象,即使配电网正常运行,中性点电位仍会发生偏移。首先分析MMC对正常运行配电网中性点电位偏移的补偿原理,以便后续分析MMC实现单相接地故障选相、自适应消弧等功能的原理。

图3(a)中,配电网正常运行时,故障支路开断, $I_F=0$,此时的零序电压用 U_{00} 表示,由式(2)可得:

$$I_{z0}=YU_{00}+Y_A E_A+Y_B E_B+Y_C E_C \quad (4)$$

式中: $Y=G+j\omega C$, G 、 C 分别为配电网三相等效对地电导和三相等效对地电容,配电网正常运行时 $G\approx 0$,则有 $Y\approx j\omega C$ 。由于 C 未知,通过向配电网注入幅值为 $|I_h|$ 的高频零序电流,并测量该频率下的零序电压幅值 $|U_h|$,可得:

$$C=\frac{|I_h|}{2\pi f_h |U_h|} \quad (5)$$

式中: f_h 为注入高频零序电流的频率。

由式(4)可知,当 $U_{00}=0$ 时有:

$$I_{z0}=Y_A E_A+Y_B E_B+Y_C E_C \quad (6)$$

当 $I_{z0}=0$ 时有:

$$Y_A E_A+Y_B E_B+Y_C E_C=-YU_{00}=-j\omega CU_{00} \quad (7)$$

综上所述,每隔一段时间将 I_{z0} 控制为微小的高频零序电流信号,用于测量 C ;由于此时 I_{z0} 很小且不含基波量,可同步测量 U_{00} 。将测得的 C 、 U_{00} 代入式(7),并联立式(6)求解得出MMC用于补偿正常运行配电网对地参数不对称的输出电流。

2.3 单相接地故障选相和自适应消弧原理

假设MMC进行配电网对地参数不对称补偿时,突发A相接地故障,联立式(2)、(6)得:

$$E_A=-(1+jK)U_0 \quad (8)$$

式中: $K=\omega CR_F$ 。

由式(8)可得,单相接地故障发生后, U_0 与故障相电源电压 E_A 间的夹角 θ 因 K 的不同而变化,如附录A图A2(a)所示。图中: U_0 沿蓝色半圆弧边界变化,当 K 趋于0时, θ 趋于 180° ;随着 K 的增大, θ 趋于 90° 。以 E_A 作为参考电压,相角为 0° ,定义 U_0 的相角为 θ_0 ,则由图A2(a)~(c)可知,发生A相接地故障时 $90^\circ<\theta_0<180^\circ$,发生B相接地故障时 $-30^\circ<\theta_0<60^\circ$,发生C相接地故障时 $-150^\circ<\theta_0<-60^\circ$,该特征可作

为故障选相判据。但因 G 可忽略、 Y 的测量误差、参数不对称补偿误差等主客观因素的存在,该判据在 K 极大或极小时都易失效。

对发生单相接地故障后的三相电压幅值 $|U_A|$ 、 $|U_B|$ 、 $|U_C|$ 和零序电压幅值 $|U_0|$ 进行关系推导可得:

$$\begin{cases} |U_A|=|E_A+U_0|=|1-\frac{1}{1+jK}| |E_A| \\ |U_B|=|E_B+U_0|=|e^{-j2\pi/3}-\frac{1}{1+jK}| |E_A| \\ |U_C|=|E_C+U_0|=|e^{j2\pi/3}-\frac{1}{1+jK}| |E_A| \\ |U_0|=\frac{|E_A|}{|1+jK|}=\frac{|E_B|}{|1+jK|}=\frac{|E_C|}{|1+jK|} \end{cases} \quad (9)$$

以10 kV配电网为例,假设故障相为A相,则 K 与A相接地故障后 $|U_A|$ 、 $|U_B|$ 、 $|U_C|$ 、 $|U_0|$ 间的关系如附录A图A3所示。由图可知:当配电网发生低阻接地故障时, K 值小,故障相电压幅值 $|U_A|$ 出现明显跌落,远小于非故障相电压幅值 $|U_B|$ 、 $|U_C|$;随着 K 的增大, $|U_A|$ 上升,并始终保持在 $|U_B|$ 、 $|U_C|$ 之间,该特征可作为 K 极大或极小时的故障选相判据。

综上所述,对不同故障电阻采用不同选相判据,可有效降低选相失误率。由式(9)可知, $|U_0|$ 与 K 负相关,通过设定阈值 U_{T1} 、 U_{T2} ,比较故障后 $|U_0|$ 与 U_{T1} 、 U_{T2} 间的大小关系,可将故障分为低阻区、中阻区和高阻区故障。为中阻区预留 15° 的角度误判裕度,则有:

$$U_{T1}=\frac{|E_A|}{\sqrt{1+K_{T1}^2}}, U_{T2}=\frac{|E_A|}{\sqrt{1+K_{T2}^2}} \quad (10)$$

式中: $K_{T1}=\tan 15^\circ$; $K_{T2}=\tan 75^\circ$ 。10 kV配电网中 $|E_A|=\sqrt{2}\times 10\times 10^3/\sqrt{3}\approx 17320$ (V),则 $U_{T1}\approx 7880$ V, $U_{T2}\approx 2110$ V,故障区间划分结果如图A3中的色块所示。

故障选相步骤总结如下:

1)单相接地故障发生后,测量零序电压并得到其幅值 $|U_0|$ 、相角 θ_0 ;

2)若 $|U_0|\geq U_{T1}$,则判定故障落在低阻区,三相中电压幅值最低相为故障相;

3)若 $U_{T2}<|U_0|<U_{T1}$,则判定故障落在中阻区, $90^\circ<\theta_0<180^\circ$ 时A相为故障相, $-30^\circ<\theta_0<60^\circ$ 时B相为故障相, $-150^\circ<\theta_0<-60^\circ$ 时C相为故障相;

4)若 $|U_0|\leq U_{T2}$,则判定故障落在高阻区,三相中电压幅值居中相为故障相。

进行故障选相后,需完成故障消弧工作。若使故障发生后 $I_F=0$,则由式(2)可得:

$$\mathbf{I}_{Z0} = \mathbf{Y}U_0 + \mathbf{Y}_A \mathbf{E}_A + \mathbf{Y}_B \mathbf{E}_B + \mathbf{Y}_C \mathbf{E}_C \quad (11)$$

由式(7)知 $\mathbf{Y}_A \mathbf{E}_A + \mathbf{Y}_B \mathbf{E}_B + \mathbf{Y}_C \mathbf{E}_C = -\mathbf{Y}U_{00}$, 且 $\mathbf{I}_F = 0$ 时, $U_A = 0 (U_0 = -E_A)$, 则有:

$$\mathbf{I}_{Z0} = -\mathbf{Y}(U_{00} - U_0) = -\mathbf{Y}(U_{00} + \mathbf{E}_A) \quad (12)$$

电压消弧法的控制目标是故障相电压为0, 因而通过实时控制 $u_0 = -e_A$ (其中: e_A 为故障相电源电压瞬时值; u_0 为故障后零序电压瞬时值) 得到零序参考电流瞬时值 i_{z0} 实现消弧。电流消弧法的控制目标是故障电流为0, 因而对 $-(e_A + u_{00})$ (其中 u_{00} 为不对称零序电压瞬时值, 由测量得到) 与 \mathbf{Y} 进行数学运算得到 i_{z0} 。电压消弧法能够适应网络结构变化, 但在故障电阻较小时消弧效果易受负荷电流影响^[9]; 电流消弧法的消弧效果稳定, 不易受负荷电流影响, 但对高阻接地故障补偿响应时间较长^[27]。结合2种消弧方法的特点, 本文提出采用自适应消弧法实现配电网单相接地故障消弧。故障选相时已对故障所属区间作出判定, 对低阻区故障选用电流消弧法, 对中、高阻区故障选用电压消弧法。相比单一消弧方法, 自适应消弧法能够充分发挥电压消弧法和电流消弧法的优势, 进一步降低故障风险和故障切除难度。

2.4 功率平衡原理

设配电网交流母线上的三相电压瞬时值为 u_A, u_B, u_C , 三相电流瞬时值为 i_A, i_B, i_C , 通过 Clark 变换, 得到 $\alpha\beta 0$ 坐标系下配电网电压瞬时值 u_α, u_β, u_0 如式(13)所示。

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} \quad (13)$$

同理可得 $\alpha\beta 0$ 坐标系下配电网电流瞬时值 i_α, i_β, i_0 。

当配电网中不存在功率补偿装置时, 源端的有功出力 p 和无功出力 q 可表示为:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (14)$$

经 Clark 反变换得:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (15)$$

假设源端的有功、无功出力参考值分别为 $p_{\text{ref}}, q_{\text{ref}}$, 代入式(15)可求得源端输出电流参考值 $i_{\alpha\text{ref}}, i_{\beta\text{ref}}$ 。为保障源端的有功、无功出力恒定, MMC 应向配电网增加注入的用于源端功率补偿的 $\alpha\beta 0$ 坐标系下的参考电流 $i_{z\alpha}, i_{z\beta}$ 可表示为:

$$\begin{bmatrix} i_{z\alpha} \\ i_{z\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha - i_{\alpha\text{ref}} \\ i_\beta - i_{\beta\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

现代配电网正从传统单向辐射状供电向潮流双向流动方向发展^[28]。PET作为一种多功能性新型电力电子设备, 有能力充当电力系统中统一潮流控制器的角色, 实现配电网间潮流的优化配置和能源的充分消纳。本节针对 PET 对配电网源端功率的平衡能力进行了研究, 由本节分析可知, 若以实时监测数据为参照, 控制 PET 的 MMC 对因负荷投入、接地故障等扰动引发的功率缺额进行补偿, 可及时有效抑制源端功率振荡。

2.5 集成化原理

由 2.2—2.4 节原理分析可知, 0 轴参考量 i_{z0} 与 α, β 轴参考量 $i_{z\alpha}, i_{z\beta}$ 间相互解耦, 基于 0 轴控制的配电网对地参数不对称补偿、单相接地故障选相、自适应消弧功能分别在配电网正常运行、接地故障初期、故障相辨识后投入, 基于 α, β 轴控制的功率平衡功能则始终与其余功能同步运行。电流参考量 $i_{z0}, i_{z\alpha}, i_{z\beta}$ 经控制器控制后分别生成电压参考信号 $u_{0\text{ref}}, u_{\alpha\text{ref}}, u_{\beta\text{ref}}$, 再经 Clark 反变换至 abc 坐标系下, 生成用于载波移相脉宽调制 CPS-PWM (Carrier Phase Shifted Pulse Width Modulation) 的三相参考信号, 控制 MMC 三相支路向配电网注入电流。下一节将对控制方法作进一步分析。

3 集成化控制的实现

3.1 实现步骤

配电网接地故障集成化消弧方法的实现流程如附录 A 图 A4 所示。将 MMC 直流侧电容中点接地, 并网后 MMC 等效为一个可控的对地电流源。配电网正常运行时, 通过算法控制使 MMC 每隔一段时间向配电网注入微小的高频零序电流, 用于参数 C 和不对称零序电压 U_{00} 的测量, 并实时监测配电网三相电压和零序电压用于各项功能的实现。MMC 可对正常配电网参数不对称引起的中性点电位偏移现象进行补偿; 一旦判断发生单相接地故障, MMC 以零序电压与三相电压间关系为依据对故障相进行辨识, 此时仍沿用上一次对地参数测量时同步测得的 U_{00} 进行参数不对称补偿; 选相结束后, 以零序电压幅值大小为投切条件实现接地故障自适应消弧。执行配电网不对称补偿、单相接地故障选相、自适应消弧时均生成 0 轴参考量, 执行功率补偿时生成 α 轴、 β 轴参考量。最后, 对各轴上参考量进行控制生成参考电压信号, 经 CPS-PWM 后控制 MMC 向配电网注入综合补偿电流。若 MMC 执行故障消弧功能, 则应在消弧补偿电流注入后的一段时间里, 逐步减少 0 轴补偿量并测量配电网零序电压是否成比例变化: 若成比例变化, 则判断故障为瞬时性接地故障, 配电网已恢复正常运行, 停止消弧补偿; 否则判断故障为永久性接地故障, 触发故障保护装置动作, 对故

障馈线进行隔离。

3.2 0轴电压控制策略

由2.2节分析可知,配电网正常运行时,由MMC向配电网注入高频零序电流,并测量其对应的高频零序电压,利用式(5)计算配电网等效对地电容 C ,同时测量不对称零序电压 U_{00} ;联立式(6)、(7)计算配电网不对称补偿参考电流值,控制MMC向配电网注入该值电流,可补偿配电网对地参数不对称引起的中性点电位偏移。由2.3节分析可知,单相接地故障发生时,测量零序电压幅值 $|U_0|$ 和相角 θ_0 ,将故障划分为低阻、中阻、高阻区故障,并根据选相判据进行故障相辨识。选相结束后启动自适应消弧,电流消弧法适用于低阻接地故障, i_{z0} 由 $-(e_A+u_{00})$ 与 Y 进行数学运算得到。电压消弧法适用于中、高阻接地故障, i_{z0} 由比例积分微分PID(Proportional Integral Derivative)控制器对 $u_0+e_A=0$ 进行控制后生成。综上所述,基于0轴的控制结构见图4。图中, f 为配电网基频,且 $f=50\text{ Hz}$ 。配电网正常运行时,MMC执行配电网对地参数不对称补偿,此时开关 S 置于端子3。一旦接收到单相接地故障发生信号,MMC启动故障选相功能,此时 S 不动作。待选相完成后, S 切换至端子1,并依照故障电阻的大小选择消弧方法:当判断故障落在中、高阻区时,选择电压消弧法, S_1 向端子4闭合;当判断故障落在低阻区时,选择电流消弧法, S_1 向端子5闭合。若 S 置于端子2,则表示正在测量配电网参数 C 和不对称零序电压 U_{00} , i_h 为微小的高频零序电流瞬时信号。最终, i_{z0} 经外环控制器生成0轴电压参考信号 $u_{0\text{-ref}}$ 。

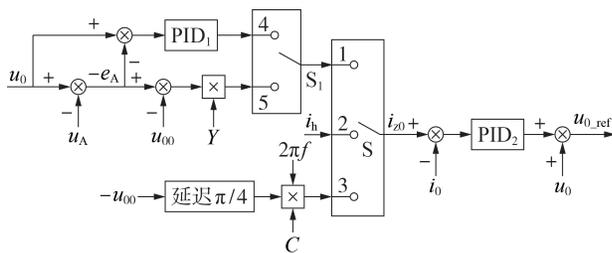


图4 基于0轴的控制结构图

Fig.4 Control diagram based on 0 axis

3.3 α 、 β 轴电压控制策略

本文采用Clark变换对多变量进行解耦。位于 $\alpha\beta$ 坐标系下的 i_{α} 、 i_{β} 为正弦信号,且与原 abc 坐标系下三相电流有相同的频率特性,因而采用准比例谐振Quasi-PR(Quasi Proportional Resonant)控制器对正弦信号进行无静差跟踪。Quasi-PR控制器传递函数 $G_{PR}(s)$ 为:

$$G_{PR}(s) = K_p + 2K_r\omega_c s / (s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2) \quad (17)$$

式中: K_p 和 K_r 分别为比例系数和谐振系数; ω_0 和 ω_c 分别为谐振频率和截止频率。 K_p 和 K_r 分别用于增

加控制精度和降低系统稳态误差,是经仿真测试选择的较优值,本文仿真模型中取 $K_p=300$ 、 $K_r=10$ 。Quasi-PR控制器在 ω_0 处具有最大增益,且相角裕度趋于无穷大,因此,令 $\omega_0=2\pi f$ ($f=50\text{ Hz}$),使Quasi-PR控制器对配电网工频信号实现零稳态误差跟踪。由于测量采样具有不确定性,送入Quasi-PR控制器的信号可能会发生小幅度的频率波动,需通过改变 ω_c 增加控制器的带宽,Quasi-PR控制器的带宽为 ω_c/π 。仿真中以《供电营业规则》第五十三条规定“电力系统非正常状况下供电频率允许偏差 $\pm 1.0\text{ Hz}$ ”为标准,取 $\omega_c=2\pi \approx 6.3\text{ rad/s}$ 。

基于 α 轴、 β 轴的控制结构如图5所示。

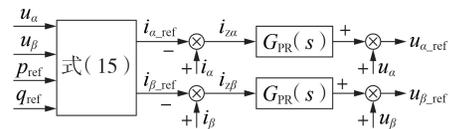


图5 基于 α 轴、 β 轴的控制结构图

Fig.5 Control block diagram based on α axis and β axis

4 仿真分析

为验证本文所提集成化消弧方法的可行性和有效性,在MATLAB/Simulink仿真环境中搭建10 kV配电网的仿真模型,如附录A图A5所示。模型包含6条馈线,模拟正常运行配电网对地参数不对称现象以及单相接地故障、负荷投入等事件发生,部分仿真参数、线路参数分别如附录A表A1、A2所示。

4.1 正常运行配电网对地参数不对称补偿

在图A5所示的配电网A相、B相、C相分别并联3、4、3 μF 对地电容模拟正常运行配电网对地参数不对称现象。控制MMC向配电网母线注入频率为300 Hz、幅值为0.5 A(实际注入电流值为0.4957 A)的高频零序电流信号,经测量得到母线处对应的高频零序电压幅值为16.85 V,代入式(5)后计算得到 $C \approx 15.61\ \mu\text{F}$ (实际配电网中 $C=15.64\ \mu\text{F}$)。0.205 s时,MMC开始向正常运行的配电网注入电流,用于补偿对地参数不对称引起的配电网中性点电位偏移,相关波形如附录A图A6所示。补偿后中性点电位偏移量由500 V降至0左右,三相电压幅值差距缩小并趋于相等,三相电压波形不平衡现象基本消除,由此验证本文所提方法能有效补偿正常运行配电网对地参数不对称引起的中性点电位偏移。

4.2 单相接地故障选相和自适应消弧

单相接地故障发生后,首先对故障相进行辨识。仿真模拟配电网不同故障相、不同故障电阻下的单相接地故障,故障点设置为图A5中的 F 处。不同故障情况下的电压参数和故障选相结果如表1所示。从表1中 $|U_A|$ 、 $|U_B|$ 、 $|U_C|$ 和 U_0 间数值关系和选相结果可知,2.3节对故障选相判据的推导是合理正确的,

也证明了采用本文方法进行配电网故障相辨识时准确性高。

表1 不同故障情况下的电压参数和故障选相结果

Table 1 Voltage parameters and fault phase selection results under different fault conditions

R_f / Ω	故障相	$ U_A / V$	$ U_B / V$	$ U_C / V$	U_0 / V	选相结果
10	A	712.2	14210.0	14880.0	8328.0 \angle 175.7°	A
30	A	1478.0	13380.0	14770.0	7913.0 \angle 170.2°	A
50	A	2221.0	12670.0	14710.0	7533.0 \angle 161.7°	A
100	A	3860.0	11320.0	14800.0	6995.0 \angle 153.4°	A
1000	A	8043.0	7489.0	9928.0	1540.0 \angle 108.9°	A
2000	A	8326.0	7908.0	9248.0	809.3 \angle 104.2°	A
3000	A	8413.0	8120.0	8974.0	537.2 \angle 102.6°	A
10	B	14840.0	718.9	14250.0	8329.0 \angle 55.70°	B
10	C	14250.0	14830.0	719.3	8329.0 \angle -64.40°	C
3000	B	9024.0	8335.0	8147.0	526.8 \angle -24.90°	B
3000	C	8109.0	9051.0	8386.0	535.2 \angle -139.6°	C

成功辨识故障相后, PET开始进行单相接地故障消弧。对电压消弧法和电流消弧法在故障电阻分别为10、1000 Ω 时的消弧效果进行对比, 结果如附录A图A7所示, 图中消弧补偿电流均从0.3 s时刻开始注入。图A7(a)中故障电阻为10 Ω , 补偿前故障电流有效值为30.37 A, 采用电流消弧法补偿约0.005 s后故障电流有效值降低至1.124 A, 而采用电压消弧法消弧后故障电流有效值始终超过10 A, 这是因为故障电阻与线路阻抗相近, 电压消弧法性能受负荷电流影响而不及电流消弧法。图A7(b)中故障电阻为1000 Ω , 2种消弧方法最终均能使故障电流有效值降低至0.4 A以下, 其中电压消弧法的响应时长约为0.003 s, 相比之下电流消弧法的响应时长要高出数十倍。这说明电流消弧法适用于低阻区故障, 电压消弧法适用于中、高阻区故障。

为了进一步验证自适应消弧法的有效性, 仿真分析了不同故障电阻、故障相情况下消弧前后的故障电流瞬时值 i_f 、MMC注入的消弧补偿电流瞬时值 i_0 和故障相电压瞬时值 u_A 的波形, 结果如附录A图A8所示。由图可见, 经自适应消弧后, 故障相电压在短时间内被抑制, 故障电流迅速降至0左右。消弧前、后故障电流有效值 I_{F1}^{RMS} 、 I_{F2}^{RMS} 如表2所示, 可见本文所提自适应消弧法对故障电流的补偿率高于93%。综上所述, 自适应消弧法对不同故障情况的

表2 补偿前、后故障电流有效值对比

Table 2 Comparison of fault current RMS between before and after compensation

R_f / Ω	I_{F1}^{RMS} / A	I_{F2}^{RMS} / A
10	30.370	1.124
50	27.900	0.987
100	24.660	0.877
500	10.360	0.614
1000	5.587	0.348

适应性强且消弧效果良好。

4.3 源端功率平衡

为验证PET对源端功率的平衡效果, 设置图A5所示的配电网原有有功负荷 $p_L=4$ MW、无功负荷 $q_L=2$ Mvar, 仿真0.2 s时向配电网投入负荷和发生单相接地故障, PET功率平衡效果如附录A图A9所示, 具体分析如下。

1) 0.2 s时向配电网投入0.5 Mvar负荷。

若此时PET不进行功率补偿, 由于电感对电流的阻碍作用, 配电网源端有功 p 和无功 q 立即发生严重振荡, 三相电流波形伴有不平衡现象, 直至0.5 s不平衡现象仍存在, 如图A9(a)左图所示。若投入负荷的同时PET进行功率补偿, 源端功率并未出现振荡, 三相电流波形也不存在不平衡现象, 如图A9(a)右图所示。

2) 0.2 s时向配电网投入 $1.0+j0.5$ MV·A阻感性负荷。

若此时PET不进行功率补偿, 由于阻感性负载中电阻会增加阻尼率, 配电网源端功率和三相电流虽发生振荡但并不明显, 源端无功在负荷投入瞬间有明显突增, 如图A9(b)左图所示(图中省略了三相电流)。若投入负荷的同时PET进行功率补偿, 源端功率振荡被迅速抑制, 源端无功未有突增现象, 如图A9(b)右图所示。

3) 0.2 s时配电网发生单相接地故障。

若此时PET不进行功率补偿, 配电网源端功率和三相电流均发生明显振荡, 如图A9(c)左图所示。若发生单相接地故障的同时PET进行功率补偿, 配电网源端并未出现功率振荡, 三相电流波形也不存在不平衡现象, 如图A9(c)右图所示。

上述结果验证了本文所提功率平衡方法能够有效抑制负荷投入或单相接地故障引起的配电网源端功率振荡。

4.4 多功能的集成化实现

为验证功率平衡与自适应消弧功能的协同效果, 仿真设置 $p_L=4$ MW、 $q_L=2$ Mvar, 并仿真负荷投入和发生单相接地故障, 结果如图6所示。图中负荷

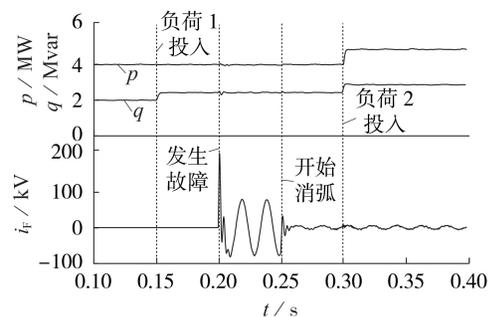


图6 功率平衡与自适应消弧协同效果

Fig.6 Synergy effect of PET's power balance and adaptive arc suppression functions

1、2的容量分别为0.5 Mvar、 $1+j0.5 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。

由图6可知:0.15 s时负荷1投入、0.2 s时单相接地故障发生,由于PET进行实时功率补偿,配电网源端功率并未发生振荡;0.25 s时PET启动自适应消弧将故障电流抑制到0左右,且未对功率平衡效果造成影响;0.3 s时负荷2投入,源端功率继续保持平衡,且消弧效果并未受影响。由此可见,功率补偿效果的稳定性不会因进行自适应消弧而减退;自适应消弧的同时进行功率补偿也并不影响消弧性能。更进一步可知,基于0轴的控制与基于 α 、 β 轴的控制间相互解耦、互不干扰。

为进一步验证多种功能在PET上的集成化应用效果,仿真设置 $p_L=4 \text{ MW}$ 、 $q_L=2 \text{ Mvar}$,并在配电网A相、B相、C相分别并联3、4、3 μF 对地电容,验证结果如图7所示。

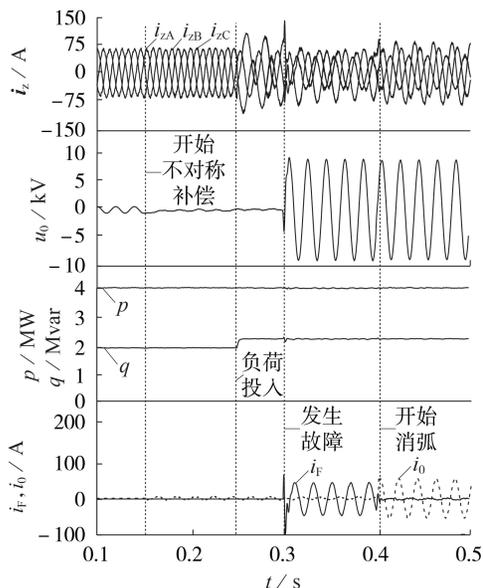


图7 集成化方法有效性验证结果

Fig.7 Effectiveness verification results of integrated method

由图7可见:0.15~0.3 s内配电网正常运行;0.15 s时PET补偿配电网对地参数不对称引起的中性点电位偏移;0.25 s时,线路6上有纯感性负荷投入,在PET的实时功率补偿下,配电网源端的有功 p 、无功 q 均未发生振荡。0.3~0.4 s时,线路5的C相发生接地故障且此时PET尚未启动消弧补偿, I_{F1}^{RMS} 高达29.71 A;0.38 s时,PET对故障相进行辨识后判断C相发生故障,并判定故障落在低阻区;0.4 s时,PET启动消弧补偿,采用的是电流消弧法,此后 i_F 被迅速被抑制, $I_{F2}^{\text{RMS}}=1.183 \text{ A}$ 。PET对地电流(零序电流 i_0)在未执行消弧时很小,且配电网单相接地故障发生后,稳态 i_F 并未因直流侧接地点的存在而增大,说明MMC直流侧电容中点接地不改变系统小电流接地性质。

综上所述,本文所提单相接地故障集成化消弧方法是有效的。

5 结论

本文以输入级为MMC拓扑的PET作为研究对象,在MMC直流电容中点设置接地支路,配合 $\alpha\beta 0$ 坐标系下多变量解耦控制,提出一种配电网接地故障集成化消弧方法,实现了一套PET装置在多场景下的灵活应用,所得结论如下。

1)分析了接地点设置的意义和影响,得出PET输入级MMC直流侧电容中点接地为其多功能集成化的实现创造条件,且不影响小电流接地系统性质。

2)基于0轴的电压调控可实现配电网对地参数不对称补偿、单相接地故障选相、自适应消弧等功能。不对称补偿改善了正常运行配电网中性点电位偏移和三相电压波形不平衡现象,有效提高了供电质量。通过对中性点与三相电压间关系划分故障区间并采用不同选相判据,可有效提高选相正确率,实现故障相精准辨识。自适应消弧法的响应时长短且消弧效果好,有利于降低故障风险和故障切除难度。

3)基于 α 、 β 轴的电压调控可实现PET对功率缺额的实时补偿,确保了配电网源端功率平衡,维持了配电网安全稳定运行。

本文尚未充分考虑设备的容量配置问题,亦无抑制间歇性电弧重燃的有效对策。下一步将设计多台电力电子设备协同控制的优化方案,在不影响设备正常工作的前提下充分利用其冗余容量;同时从破坏故障电弧重燃条件的角度出发,对消弧方法进行进一步优化。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 薛永端,任伟,唐毅,等. 基于热稳定原理的中性点小电阻接地系统间歇接地故障保护[J]. 电力系统自动化,2021,45(18):122-130.
XUE Yongduan,REN Wei,TANG Yi,et al. Intermittent grounding fault protection based on principle of thermal stability for low resistance neutral grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(18):122-130.
- [2] 郑鹏鹏. 配电网消弧装置应用中相关问题的研讨[J]. 电力自动化设备,2007,27(8):115-118.
ZHENG Pengpeng. On arc suppression device applications in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007,27(8):115-118.
- [3] 陈锐,周丰,翁洪杰,等. 基于双闭环控制的配电网单相接地故障有源消弧方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(5):128-133.
CHEN Rui,ZHOU Feng,WENG Hongjie,et al. Active arc-suppression method based on double closed-loop control under single-phase grounding faults in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(5):128-133.
- [4] 郭谋发,游建章,张伟骏,等. 基于三相级联H桥变流器的配电

- 网接地故障分相柔性消弧方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17):11-22.
- GUO Moufa, YOU Jianzhang, ZHANG Weijun, et al. Separate-phase flexible arc-suppression method of earth-fault in distribution systems based on three-phase cascaded H-bridge converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17):11-22.
- [5] 刘维功, 薛永端, 徐丙垠, 等. 可适应线路结构动态变化的有源消弧算法[J]. 电网技术, 2014, 38(7):2008-2013.
- LIU Weigong, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. An active arc-suppression algorithm adaptable to dynamic structure variation of transmission line[J]. Power System Technology, 2014, 38(7):2008-2013.
- [6] WINTER K M. The RCC ground fault neutralizer-a novel scheme for fast earth-fault protection[C]//CIRED 2005-18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Turin, Italy: IET, 2005:1-4.
- [7] JANSSEN M, KRAEMER S, SCHMIDT R, et al. Residual Current Compensation (RCC) for resonant grounded transmission systems using high performance voltage source inverter[C]//2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Dallas, TX, USA: IEEE, 2003:574-578.
- [8] 卓超, 曾祥君, 彭红海, 等. 配电网接地故障相主动降压消弧成套装置及其现场试验[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1):48-58.
- ZHUO Chao, ZENG Xiangjun, PENG Honghai, et al. Arc suppression device with active reduction of grounding fault phase voltage and field test for distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1):48-58.
- [9] 陈柏超, 王朋, 沈伟伟, 等. 电磁混合式消弧线圈的全补偿故障消弧原理及其柔性控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10):311-318.
- CHEN Baichao, WANG Peng, SHEN Weiwei, et al. The principle of full compensation arc suppression and flexible control of electromagnetic hybrid Petersen coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10):311-318.
- [10] 王朋, 田翠华, 陈柏超, 等. 基于新型磁控消弧线圈的电磁混合消弧及配合选线新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16):175-183.
- WANG Peng, TIAN Cuihua, CHEN Baichao, et al. Electromagnetic hybrid arc suppression and a novel method of feeder selection based on the novel magnetic controlled Petersen coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16):175-183.
- [11] WANG Peng, CHEN Baichao, TIAN Cuihua, et al. A novel neutral electromagnetic hybrid flexible grounding method in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3):1350-1358.
- [12] 郭谋发, 陈静洁, 张伟骏, 等. 基于单相级联H桥变流器的配电网故障消弧与选线新方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9):2677-2684.
- GUO Moufa, CHEN Jingjie, ZHANG Weijun, et al. A novel approach for fault arc extinguishing and feeder selection in distribution networks based on single-phase cascade H-bridge converter[J]. Power System Technology, 2015, 39(9):2677-2684.
- [13] 李晓波, 王崇林. 零残流消弧线圈综述[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6):116-121.
- LI Xiaobo, WANG Chonglin. Survey of zero-residual-current arc suppression coil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6):116-121.
- [14] 贾晨曦, 杨龙月, 杜贵府. 全电流补偿消弧线圈关键技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9):145-154.
- JIA Chenxi, YANG Longyue, DU Guifu. Review of key technologies on full current compensation arc suppression coil[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9):145-154.
- [15] 李涛, 苗晓鹏, 李晓波. 基于恒定零序电压幅值的消弧线圈调谐新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9):86-90.
- LI Tao, MIAO Xiaopeng, LI Xiaobo. A new tuning method of arc suppression coil based on the constant zero-sequence voltage amplitude[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9):86-90.
- [16] 桑振华, 苗晓鹏, 李晓波, 等. 基于调相法的消弧线圈自动跟踪补偿的测量方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10):104-107.
- SANG Zhenhua, MIAO Xiaopeng, LI Xiaobo, et al. A new measurement method of automatic tracking compensation arc-suppression coil based on the phase modulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10):104-107.
- [17] 邱伟强, 郭谋发, 郑泽胤. 基于单一直流源级联H桥变流器的配电网接地故障柔性消弧方法[J]. 电网技术, 2019, 43(10):3848-3858.
- QIU Weiqiang, GUO Moufa, ZHENG Zeyin. Flexible arc-suppression method based on single-DC-source cascaded H-bridge converter for earth fault in distribution networks[J]. Power System Technology, 2019, 43(10):3848-3858.
- [18] KOMRSKA T, PEROUTKA Z, MATULJAK I. Distributed compensation including earth fault compensation for renewable energy resources[C]//IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna, Austria: IEEE, 2013:643-648.
- [19] ZHOU Xingda, LU Shuai. A multifunctional active grounding method for distribution networks based on a four-leg converter[C]//2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2020:1770-1777.
- [20] 曾祥君, 卓超, 喻锟, 等. 基于接地变压器绕组分档调压干预的配电网主动降压消弧与保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5):1523-1533.
- ZENG Xiangjun, ZHUO Chao, YU Kun, et al. A novel method of faults arc extinguishing and feeder protection based on voltage regulating intervention with grounding transformer winding taps for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5):1523-1533.
- [21] OUYANG Shaodi, LIU Jinjun, YANG Yue. Control strategy for arc suppression-coil-grounded star-connected power electronic transformers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6):5294-5311.
- [22] 王雪文, 石访, 张恒旭, 等. 基于暂态能量的小电流接地系统单相接地故障区段定位方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3):818-825.
- WANG Xuewen, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. A single-phase earth fault location method based on transient energy for non-effectively grounded system[J]. Power System Technology, 2019, 43(3):818-825.
- [23] ACUÑA P, MORÁN L, RIVERA M, et al. Improved active power filter performance for renewable power generation systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2):687-694.
- [24] 刘涛, 王慧慧, 葛磊蛟, 等. 基于FCS-MPC的电能质量综合调节器补偿策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(9):3377-3384.
- LIU Tao, WANG Huihui, GE Leijiao, et al. Power quality integrated regulator compensation strategy based on FCS-MPC[J]. Power System Technology, 2019, 43(9):3377-3384.
- [25] 王哲, 李耀华, 李子欣, 等. 三相级联H桥型电力电子变压器电容值设计方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1):219-224.
- WANG Zhe, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Design method of capacitance value of three-phase cascaded H-bridge power electronic transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,

- 2020,40(1):219-224.
- [26] 李俊杰,吕振宇,吴在军,等. 基于电力电子变压器的交直流混合微电网运行模式自适应切换策略[J]. 电力自动化设备, 2020,40(10):126-131,138.
LI Junjie, LÜ Zhenyu, WU Zaijun, et al. Adaptive switching strategy of AC/DC hybrid microgrid operating mode based on power electronic transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(10):126-131,138.
- [27] 张毅,薛永端,宋华茂,等. 低阻接地故障有源电压消弧算法性能分析和改进[J]. 电网技术, 2017,41(1):314-321.
ZHANG Yi, XUE Yongduan, SONG Huamao, et al. Performance analysis and improvement of active voltage arc-suppression algorithm about low resistance grounding fault[J]. Power System Technology, 2017,41(1):314-321.
- [28] 涂春鸣,李庆,郭祺,等. 具备电压质量调节能力的串并联一体化多功能变流器[J]. 电工技术学报, 2020,35(23):4852-4863.
TU Chunming, LI Qing, GUO Qi, et al. Research on series-

parallel integrated multifunctional converter with voltage quality adjustment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020,35(23):4852-4863.

作者简介:



简玉婕

简玉婕(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为配电网自动化(**E-mail**: 1208567769@qq.com);

郭谋发(1973—),男,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为配电网单相接地故障信息处理、保护控制及柔性消弧等(**E-mail**: gmf@fzu.edu.cn);

游建章(1990—),男,博士研究生,研究方向为配电网自动化(**E-mail**: 282304815@qq.com)。

(编辑 任思思)

Integrated arc suppression method of single-phase grounding fault in distribution network with power electronic transformer

JIAN Yujie, GUO Moufa, YOU Jianzhang

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: With the grounding branch set in the middle point of the capacitors on DC side of the input converter of the power electronic transformer, and combining with the multivariable decoupling control under $\alpha\beta$ coordinate system, the integrated arc suppression method for single-phase grounding fault in distribution network is proposed, which has the functions of distribution network asymmetry parameter compensation, single-phase grounding fault phase selection and adaptive arc suppression based on 0 axis voltage regulation, and the function of source-side power balance based on α axis and β axis voltage regulation. Under the normal operation of distribution network, the neutral point potential deviation caused by the asymmetry of distribution network parameters to ground is monitored in real time, and the compensation current is calculated according to the deviation value and injected into distribution network to eliminate the neutral point potential deviation. When the single-phase grounding fault occurs in distribution network, the amplitude and angle relationship between zero-sequence voltage and three-phase voltage are compared to recognize the fault phase. The amplitude of zero-sequence voltage is taken as the switching condition of adaptive arc suppression. The power oscillation caused by load switching or fault is suppressed by real-time compensation for source-side power. Simulative results by MATLAB/Simulink validate the feasibility and effectiveness of the proposed integrated arc suppression method.

Key words: distribution network; power electronic transformer; grounding mode; integrated arc suppression; power balance

附录 A

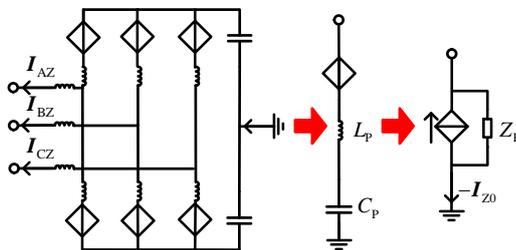


图 A1 MMC 简化电路图
Fig.A1 Simplified circuit of MMC

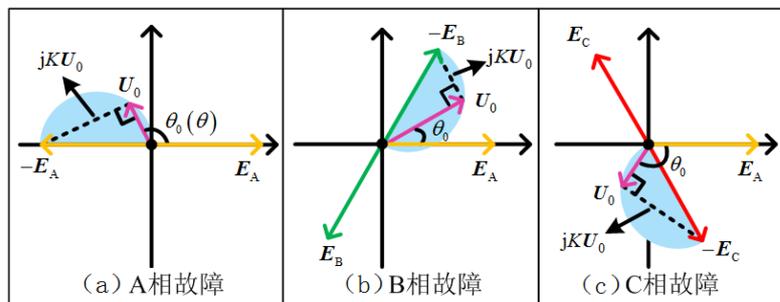


图 A2 不同相发生单相接地故障时的 U_0 与 E_A 关系图

Fig.A2 Relationship between U_0 and E_A when single-phase grounding fault occurs in different phases

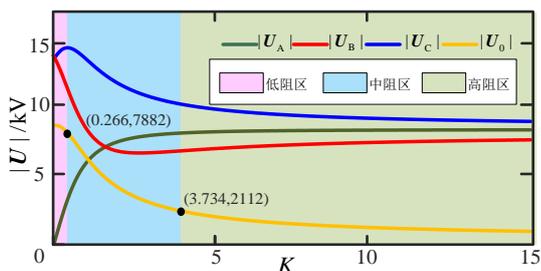


图 A3 K 与 $|U_A|$ 、 $|U_B|$ 、 $|U_C|$ 、 $|U_0|$ 关系

Fig.A3 Relationship between K and $|U_A|$, $|U_B|$, $|U_C|$ and $|U_0|$

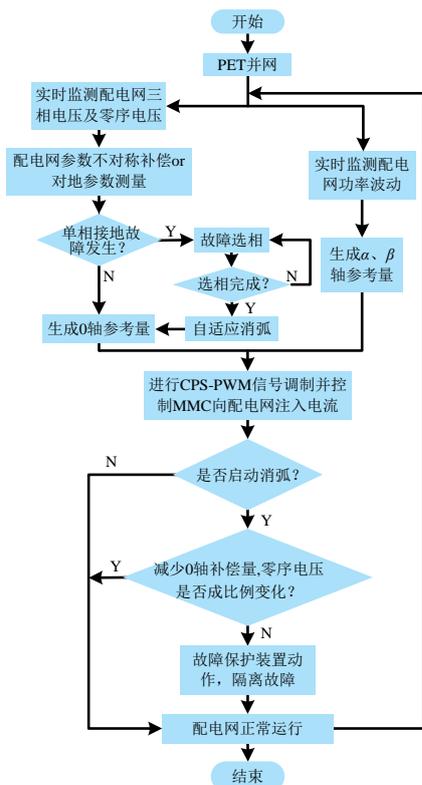


图 A4 集成化控制流程图

Fig.A4 Flowchart of the integration control

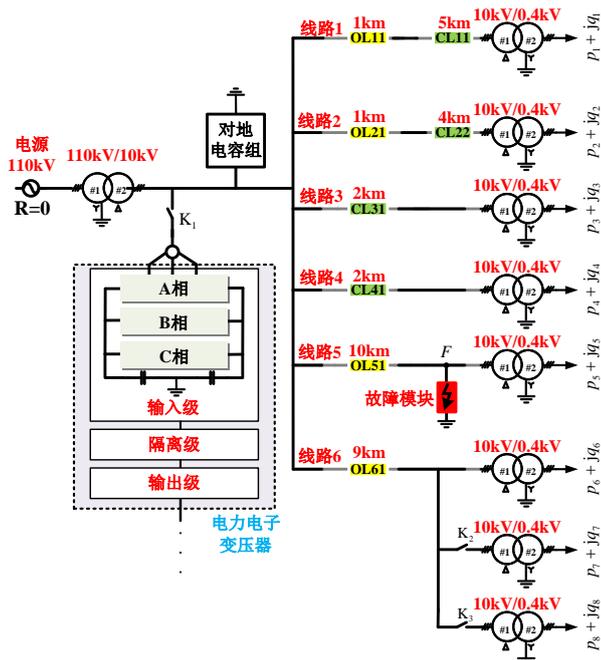


图 A5 含 6 馈线的配电网线路结构图

Fig.A5 Structure of distribution network with six feeders

表 A1 仿真参数

Table A1 Simulation parameters

参数	参数值
A 相/B 相/C 相并联对地电容	3 μ F/4 μ F/3 μ F
三相总对地电阻 R_0/Ω	3.112 $\times 10^4$
三相总对地电容 C_0/μ F	15.64
MMC 桥臂电感 L_{arm}/H	0.01
MMC 桥臂电阻 R_{arm}/Ω	1
连接电感 L_{sc}/H	0.1

表 A2 线路参数

Table A2 Parameters of lines

线路类型	相序	电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电容/ ($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)	电感/ ($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)
架空线路	零序	0.3200	0.0062	3.5600
	正序	0.1700	0.0115	1.0170
电缆线路	零序	2.7000	0.2800	1.0190
	正序	0.2700	0.3390	0.2550

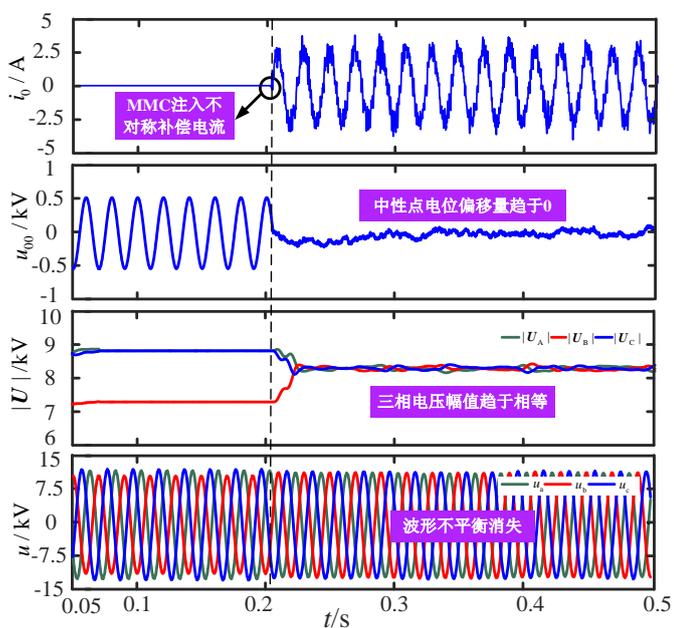


图 A6 MMC 补偿正常运行配电网对地参数不对称

Fig.A6 MMC compensates parametric asymmetry of distribution network

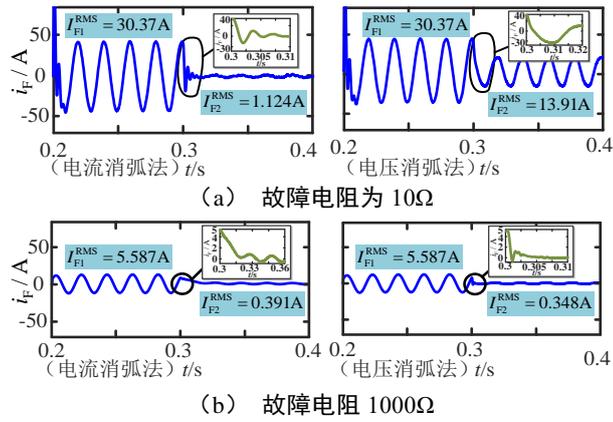
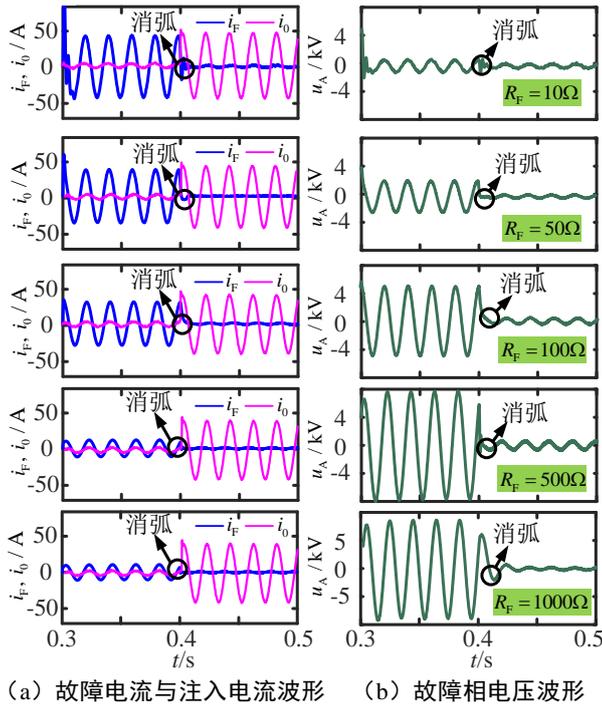


图 A7 电压消弧法和电流消弧法的对比

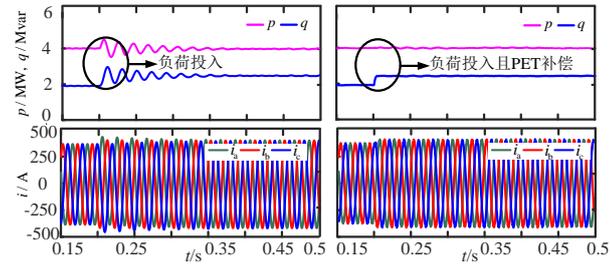
Fig.A7 Comparison between voltage and current arc suppression algorithms



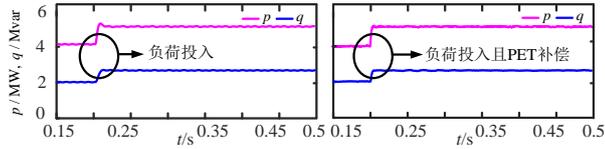
(a) 故障电流与注入电流波形 (b) 故障相电压波形

图 A8 PET 自适应消弧效果

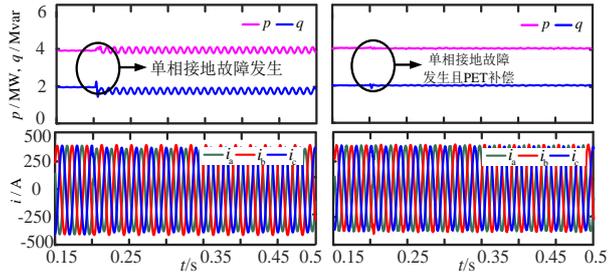
Fig.A8 PET's adaptive arc suppression effect



(a) 0.2s 时向配电网投入 0.5Mvar 负荷



(b) 0.2s 时向配电网投入 $1.0+j0.5\text{MV}\cdot\text{A}$ 阻感性负荷



(c) 0.2s 时配电网发单相接地故障

图 A9 功率平衡效果

Fig.A9 PET's power balance effect