

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.02.019

基于模型预测控制的配电网单相接地故障有源消弧

常新建¹, 邵文权¹, 程远¹, 卫晓辉²

(1. 西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048;

2. 国网陕西省电力公司西安供电公司, 陕西 西安 710032)

摘要:针对配电网非有效接地系统中单相接地故障消弧的难题,现多采用附加有源补偿和消弧线圈相结合的方案对接地故障电弧进行抑制,而有源补偿系统控制策略的性能直接决定了消弧性能。文中设计了基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的有源消弧实现方案,首先分析采用注入电流方式的有源消弧原理,然后采用三级联H桥多电平逆变器作为有源消弧系统主拓扑,优选代价函数,设计基于MPC的有源消弧闭环控制系统。该控制系统相较于基于比例积分(proportional integral, PI)控制的有源消弧闭环控制系统,无须进行参数整定即可实现对多次谐波电流的精确追踪,进而有效补偿接地电流。仿真及实验结果均表明:文中所提方案能更加有效地抑制接地故障电流,满足不同场景可靠消弧的要求。

关键词:级联H桥;单相接地故障;消弧线圈;模型预测控制(MPC);电流注入;有源消弧

中图分类号: TM862

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)02-0161-09

0 引言

配电网规模大、分支众多且运行方式多变。配电网故障中单相接地故障发生率超过70%^[1]。为抑制单相接地故障电流,实现电弧可靠熄灭,我国中压配电网通常采用消弧线圈接地方式^[2-4]。随着城市配电网线路电缆化程度越来越高,故障点电容电流水平可高达上百安培,使得发生单相接地故障时残余电流有所增大且包含较大的有功分量和谐波分量,影响消弧线圈接地系统接地故障残流的可靠熄弧^[5]。

采用消弧线圈的无源消弧方法只能补偿接地故障电流中的基波无功分量,而随调式消弧线圈更易受开关控制影响,导致补偿响应无法快速跟踪故障电弧,难以有效熄灭故障电弧^[6-7]。有源消弧方法利用有源补偿装置向系统注入补偿电流,补偿接地残流中的感性分量、谐波分量和有功分量,实现接地电流全补偿^[8]。为了实现接地残流的完全补偿,有源消弧装置注入补偿电流的控制系统设计极为关键。由于比例积分(proportional integral, PI)控制无法无静差跟踪交流信号、抗干扰性较差,文献[9]采用比例谐振控制实现交流信号的无静差跟踪,但其参数整定困难,且稳定性较差、数字实现复杂。文献[10]提出一种滞环控制策略,具有响应速度快的特点,然而其特有结构决定了装置开关频率不稳定,易加剧有源消弧系统电力电子器件的老化。

而模型预测控制(model predictive control, MPC)作为一种先进的控制方法,具有算法简单、响应速度快、动态性能优异且抗扰动性较强等优点,能够实现多次谐波的无静差追踪,且无须进行复杂的参数整定。文献[11]引入MPC方法实现对单相级联H桥多电平整流器的精确控制,文献[12]引入MPC方法对三电平三相逆变器进行设计,也取得了较好的效果。

为了能够达到对接地残流全补偿的要求,文中引入MPC方法对配电网有源消弧控制系统进行优化设计,由于级联H桥多电平逆变器相比传统逆变器拓扑具有各功率单元结构相同、冗余程度高、易于模块化封装、输出谐波含量低等优点,文中选取级联H桥多电平逆变器作为有源消弧系统主拓扑。仿真及实验结果均表明:MPC较常规控制方法具有更加优异的性能,无须进行参数调节,响应速度更快,补偿后残余电流更小。

1 配电网单相接地故障消弧原理

文中采用级联H桥多电平逆变器与消弧线圈相结合的配电网单相接地故障补偿方案。当配电网发生单相接地故障时,消弧线圈首先对接地故障电流中的无功部分进行补偿,然后控制级联H桥多电平逆变器向配电网注入补偿电流,对接地电流的残余部分进行补偿,最终实现接地电流全补偿。

配电网单相接地故障有源消弧示意如图1所示,假设配电网共有 n 条线路,图1为配电网第 n 条线路的A相发生单相接地故障的示意。配电网的 n

收稿日期:2022-05-24;修回日期:2022-10-13

基金项目:陕西省重点研发计划资助项目(2020GY-167)

条线路分别为 $l_1 \sim l_n$, 其零序导纳分别为 $Y_{01} \sim Y_{0n}$; R_d 为接地故障处的过渡电阻; \dot{I}_f 为接地故障电流; \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 分别为配电网三相电源电压; \dot{U}_0 为故障发生后中性点位移电压; L_1 为消弧线圈等效电感; L_2 为级联 H 桥多电平逆变器串联滤波电感; 令 $L = L_1 + L_2$, L 为级联 H 桥多电平逆变器输出电流流经的总电感; R 为滤波电感等效电阻; \dot{U} 为级联 H 桥多电平逆变器输出电压; \dot{I}_{in} 为级联 H 桥多电平逆变器注入电流。

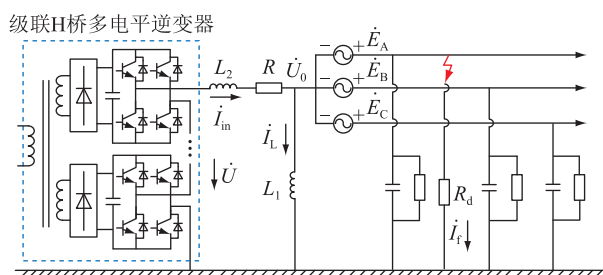


图1 配电网单相接地故障有源消弧示意

Fig.1 Schematic diagram of active arc suppression of a single-phase grounding fault in the distribution network

为进一步分析有源消弧机理,建立配电网有源消弧零序模型,如图2所示。

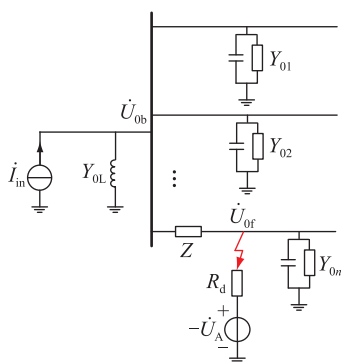


图2 配电网有源消弧零序模型

Fig.2 Zero sequence model of active arc suppression in the distribution network

级联 H 桥多电平逆变器可等效为理想电流源 \dot{I}_{in} , 当发生单相接地故障时, 故障点零序模型可认为是过渡电阻 R_d 与故障前故障点电压负值 $-\dot{U}_A$ 的串联^[13]。为简便计算, 忽略消弧线圈、非故障线路和故障线路故障点下游线路的零序阻抗, 利用零序导纳模型进行处理。设消弧线圈的零序导纳为 Y_{0L} , 非故障馈线和消弧线圈的零序导纳之和为 Y_{0m} 。故障线路须考虑母线到故障点的电压降, 故采用 Γ 型模型, 其中母线到故障点的零序阻抗设为 Z , 故障线路 n 故障点上、下游的零序导纳为并联关

系, 可简化为 Y_{0n} 。设故障点零序电压为 \dot{U}_{of} , 母线处零序电压为 \dot{U}_{0b} 。

则由图2模型分析可得:

$$\dot{U}_{of} = \frac{\dot{I}_{in} R_d - \dot{U}_A (Y_{0m} Z + 1)}{Y_{0n} R_d + Y_{0m} Y_{0n} Z R_d + 1 + Y_{0m} Z + Y_{0n} R_d} \quad (1)$$

有源消弧方法主要适用于低阻接地故障^[14], 而消弧线圈是一个具有较小电阻和较大感抗的铁芯线圈, 所以控制故障点电压为0, 可认为控制故障电流为0。

当控制故障点电压为0时, 有:

$$\dot{U}_{of} + \dot{U}_A = 0 \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得理想注入指令电流为:

$$\dot{I}_{in}^* = -\dot{U}_A (Y_{0m} + Y_{0n} + Y_{0m} Y_{0n} Z) \quad (3)$$

故障发生前故障位置电压 \dot{U}_A 较难获取, 此时可近似为电源电压 \dot{E}_A 。 $Y_{0m} Y_{0n} Z$ 与 Y_{0m} 、 Y_{0n} 相比极小, 可以忽略不计。 $Y_{0m} + Y_{0n}$ 为消弧线圈投入后的零序导纳, 设其为 Y_0 , 则有:

$$\dot{I}_{in}^* = -\dot{E}_A Y_0 \quad (4)$$

整理式(1)一式(4)可得故障点残流为:

$$\dot{I}_\sigma = \frac{-\dot{U}_A [Y_{0m} (1 + Z/R_d) + Y_{0n} (Y_{0m} Z - 1)]}{1 + Y_{0n} Z + Z/R_d} \quad (5)$$

当接地故障电流的谐波含量比较大时, 还应考虑对接地故障电流中的谐波分量进行补偿。根据式(5)同理可得注入的谐波电流补偿量为:

$$\dot{I}_h = \sum_{k=2}^{\infty} \frac{-\dot{U}_{0k} [Y_{0mk} (1 + Z_k/R_d) + Y_{0nk} (Y_{0mk} Z_k - 1)]}{1 + Y_{0nk} Z_k + Z_k/R_d} \quad (6)$$

式中: \dot{U}_{0k} 为故障后中性点零序电压 k 次谐波分量; Y_{0nk} 为故障线路故障点上、下游在 k 次谐波下的零序导纳之和; Y_{0mk} 为非故障馈线与消弧线圈在 k 次谐波下的对地零序导纳之和; Z_k 为 k 次谐波下母线到故障点的零序阻抗。

2 有源消弧控制系统设计

2.1 有源消弧系统主拓扑

有源消弧系统采用级联 H 桥多电平结构作为主拓扑, 如图3(a)所示, 其由 N 个 H 桥功率单元级联组成。H 桥功率单元如图3(b)所示, 假设每个 H 桥功率单元直流侧电压相等, 均为 U_{dc} 。单个 H 桥

可输出 3 种电平,即 $-U_{dc}$ 、 0 、 U_{dc} ,单个 H 桥单元直流侧电压相等,均为 U_{dc} 。

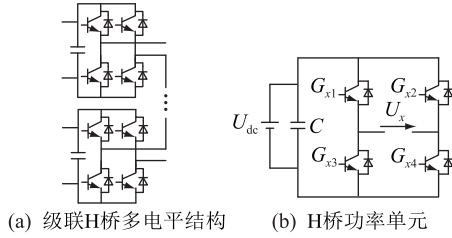


图 3 级联 H 桥多电平逆变器

Fig.3 Cascaded H-bridge multilevel inverter

第 x 个 H 桥功率单元中开关的状态由门极信号 G_x 决定, $G_x = 1$ 表示此时开关闭合, $G_x = 0$ 表示此时开关断开。则第 x 个 H 桥功率单元的输出电压可表示为:

$$U_x = U_{dc}(G_{x1} - G_{x2}) \quad (7)$$

式中: G_{x1} 、 G_{x2} 分别为第 x 个 H 桥功率单元左、右桥臂的上开关状态。级联 H 桥多电平逆变器总的输出电压可表示为:

$$U = \sum_{x=1}^N U_x = \sum_{x=1}^N U_{dc}(G_{x1} - G_{x2}) \quad (8)$$

2.2 MPC 方法

2.2.1 MPC 的基本原理

MPC 的基本原理是使用系统的整体 MPC 变量在很短一段时间内的变化,根据预先定义的最优化准则,确定最优操作方式^[15],主要依据控制系统的离散时间模型推导得到系统在下一时刻的输出状态^[16]。文中设计的 MPC 系统则主要通过采样当前 k 时刻逆变器输出电流值与电网侧电压值,利用软件锁相程序得到与配电网侧同频率同相位的指令电流参考值,然后根据系统模型预测 $k+1$ 时刻逆变器的输出电流大小,并通过预先定义的代价函数进行评估,从评估结果中选取使预先定义的代价函数值达到最优时所对应的输出矢量,进而控制开关管的开通与关断。

2.2.2 代价函数的选取

建立代价函数的目的是从控制系统全部预测输出值中选择输出最优值对应的开关状态,使 $k+1$ 时刻系统输出的误差量达到最小,所以对 MPC 系统来说代价函数的选取极为关键。

有源消弧装置中逆变器控制的目的是使级联 H 桥多电平逆变器输出电流与预先给定指令电流之间的误差为最小,因此定义代价函数为:

$$g = |i_a^*(k+1) - i_a(k+1)| \quad (9)$$

式中: $i_a^*(k+1)$ 、 $i_a(k+1)$ 分别为 $k+1$ 时刻逆变器的指令电流与预测输出电流。级联 H 桥多电平逆

变频器输出后注入中性点的电流,可以通过二次注入法求得^[17]。在采样间隔足够小的前提之下,有:

$$i_a(k+1) = i_a(k) \quad (10)$$

式中: $i_a(k)$ 为 k 时刻逆变器的输出电流; $i_a(k+1)$ 可以根据系统离散时间模型推导得出。

根据图 1 可得级联 H 桥多电平逆变器的等效数学模型为:

$$u = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a \quad (11)$$

式中: u 为级联 H 桥多电平逆变器的输出电压瞬时值。

假设系统的采样周期为 T_s ,则式(11)中的微分项可近似为:

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{i_a(k+1) - i_a(k)}{T_s} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11),可得 $k+1$ 时刻逆变器预测输出电流为:

$$i_a(k+1) = \left(1 - R \frac{T_s}{L}\right) i_a(k) + \frac{T_s}{L} u(k) \quad (13)$$

根据式(13)可以预测逆变器在所有可能的开关组合下 $k+1$ 时刻的电流输出值 $i_a(k+1)$ 。

2.3 简化 MPC 系统设计

MPC 的采样、预测以及代价函数的评估、输出在理想状态下应在同一瞬间完成^[18],但在实际应用中由于采样和输出之间必然存在一定的延时,这种延时会使级联 H 桥多电平逆变器输出电流相对指令电流产生一定的相位偏移^[19-21],从而产生较大误差。对于单相三级联 H 桥多电平逆变器来说,共有 64 种不同的开关状态组合,去掉冗余开关序列,剩下的开关状态组合如表 1 所示。

表 1 开关状态

Table 1 Switch states

开关状态						输出电平
S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	U_{dc}
1	0	1	0	1	0	$2U_{dc}$
1	0	1	0	1	0	$3U_{dc}$
0	1	0	0	0	0	$-U_{dc}$
0	1	0	1	0	0	$-2U_{dc}$
0	1	0	1	0	1	$-3U_{dc}$

表 1 中 S_1 — S_6 分别表示三级联 H 桥多电平逆变器中 3 个 H 桥功率单元左右桥臂的导通和关断,其值取 0 表示桥臂上开关关断、下开关导通,其值取 1 表示桥臂上开关导通、下开关关断。

由表 1 可知,7 种不同的开关状态组合分别对

应7种不同的电平状态。因为在每个采样周期内都要对不同的开关状态进行逆变器预测输出电流的计算,随着H桥功率单元级联数目的增加,输出电平数也会大量增加^[22-26]。随之而来的是计算量的增加,进而造成一定延时,致使逆变器输出的实际电流与理想指令电流在幅值和相位上均有一定的偏差。因此,文中首先考虑优化MPC计算步骤进行延时补偿,并在此基础上,进一步简化MPC控制策略,克服计算延时误差对逆变器输出电流的影响。该方法仍以常规2步MPC为基础,然后考虑逆变器输出的相邻电平数来简化控制器的计算量,此方法适用于控制任意电平数的逆变器。MPC系统结构如图4所示。图4中, $e(t)$ 、 $i_a(t)$ 分别为电网侧电压和级联H桥多电平逆变器输出电流; $e(k)$ 、 $i_a(k)$ 分别为 $e(t)$ 、 $i_a(t)$ 的 k 时刻采样值; $S(k)$ 为最优开关状态组合; U_{pout} 为级联H桥多电平逆变器最优输出电压; $i_a^*(k)$ 为 $i_a(k)$ 的指令值; θ 为电网侧故障相电压的相位。

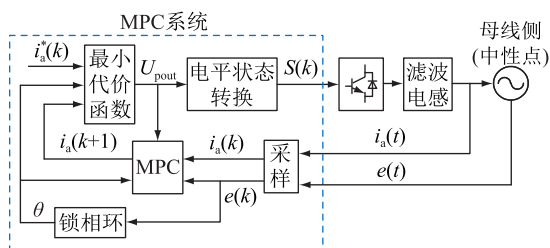


图4 MPC系统结构

Fig.4 Structure of MPC system

根据式(13)可计算得出 $k+1$ 时刻逆变器预测输出电流 $i_a(k+1)$ 为:

$$i_a(k+1) = \left(1 - R \frac{T_s}{L}\right) i_a(k) + \frac{T_s}{L} U_{\text{pout}}(k) \quad (14)$$

根据 $k+1$ 时刻的逆变器给定指令电流值预测 $k+2$ 时刻所有开关状态下的中性点注入电流值,从所有开关状态中选择使输出误差即代价函数最小的开关状态作为此时的最优值,根据式(14)可得出 $k+2$ 时刻逆变器预测输出电流 $i_a(k+2)$ 为:

$$i_a(k+2) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i_a(k+1) + \frac{T_s}{L} U_{\text{pout}}(k+1) \quad (15)$$

在采样间隔足够小的前提下,MPC方法具体流程如图5所示。图5中, x_1 为逆变器实际已输出电平状态的组合, X_1 为逆变器所有输出电平状态的组合。具体流程为:(1)依据上一时刻,获取使代价函数最小的最优开关状态,并更新当前状态;(2)通过

采样得到级联H桥多电平逆变器输出电流和电网侧电压;(3)通过锁相与二次注入法得到与电网侧电压同频同相的指令电流;(4)依据式(13)和当前时刻的开关状态计算 $k+1$ 时刻的级联H桥多电平逆变器输出电流;(5)根据式(15)预测所有开关状态组合下级联H桥多电平逆变器在 $k+2$ 时刻的输出电流值;(6)根据式(9)推导出的代价函数,评估 $k+2$ 时刻的级联H桥多电平逆变器预测输出电流,选出代价函数最小时对应的电压矢量;(7) $k+1$ 时刻重新从步骤(1)循环上述流程,即进入下一周期。

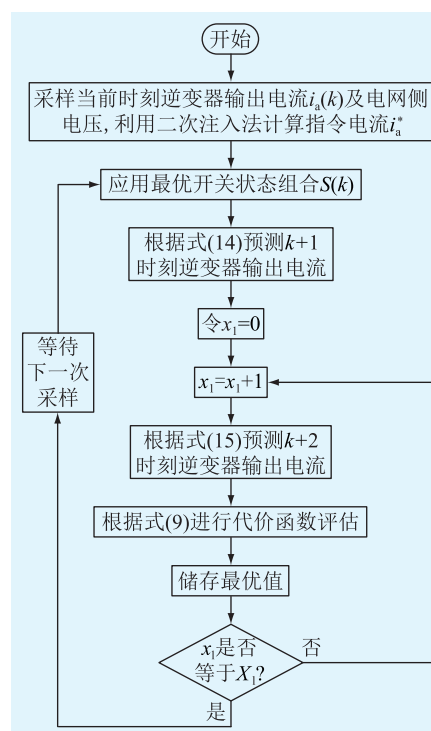


图5 MPC流程

Fig.5 Flow chart of MPC

上述MPC系统在每个采样周期内均考虑了系统对应的所有可能输出状态。随着H桥功率单元级联数目的增加,输出电平数会增多,导致控制器的计算量成倍增加,进而导致输出在相位上有较大延迟^[27-30]。因此文中考虑对该控制算法进行简化,具体方法如下:若采样间隔足够小,对于三级联H桥多电平逆变器,假设在 $k-1$ 时刻经过代价函数评估,此时的最优输出为一电平,则 k 时刻最优的输出状态就可能为一电平、二电平、零电平。假设在 $k-1$ 时刻经过代价函数评估,此时的最优输出为三电平,则 k 时刻最优的输出就是二电平和三电平,此时只要对相邻电平进行代价函数评估就能实现对输出电流的精确控制。常规MPC的代价函数评估计算次数与输出电平数成正比,而对于简化MPC,在每个采样周期只考虑相邻电平数,所以很大程度上

简化了计算,优化了控制器的计算时间。

3 仿真分析

为了验证文中所提配电网单相接地故障有源消弧控制算法的有效性,利用 Matlab 搭建如图 6 所示 10 kV 配电网仿真模型进行验证。

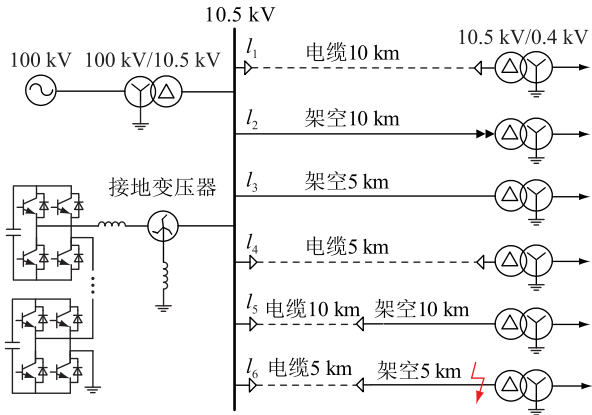


图 6 配电网单相接地故障有源消弧仿真模型

Fig.6 Active arc suppression simulation model for single-phase grounding fault in the distribution network

图 6 中,有源消弧系统采用三级联 H 桥多电平逆变器拓扑;直流侧供电电源电压为 4 kV;并网进线电感起滤波及跟踪电流作用,取 35 mH;负载采用 RLC 模型;主变压器连接组别为 Yd11;配电变压器连接组别为 Dy11;6 条馈线采用 Bergeron 模型,主要参数如表 2 所示。

表 2 馈线参数

Table 2 Line parameters

线路类型	相序	电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电感/ ($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)	电容/ ($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)
架空	正序	0.125 0	1.300 0	0.009 6
	零序	0.275 0	4.600 0	0.012 0
电缆	正序	0.270 0	0.225 0	0.339 0
	零序	2.700 0	1.019 0	0.280 0

线路对地电容为 52.56 μF ,中性点经消弧线圈接地,配置脱谐度为 1%的过补偿消弧线圈,线圈电感为 0.112 8 H,电阻为 10 Ω 。为研究文中方法对接地电流谐波的抑制效果,在负载侧加入三相整流电路,在发生单相接地故障时,接地电流谐波含量为 13.59%。

在仿真模型中设置单相接地故障发生在馈线 l_6 的 A 相,故障发生时刻为 0.05 s,有源消弧装置投入时刻为 0.2 s,仿真总时长为 0.4 s。

首先通过仿真对比常规 PI 控制方法与 MPC 方法下三级联 H 桥多电平逆变器对谐波电流的跟踪效果,仿真结果见图 7。

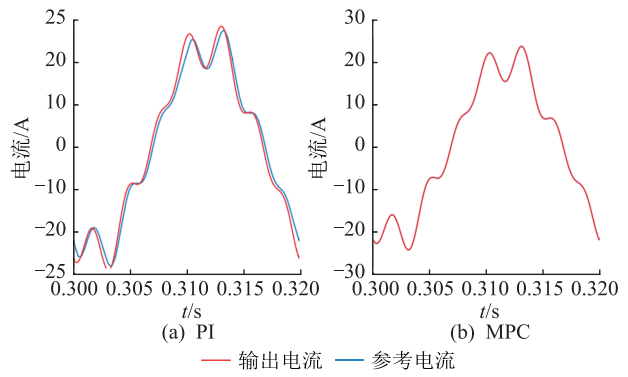


图 7 采用 PI 和 MPC 的电流跟踪性能比较

Fig.7 Comparison of current tracking performance under PI and MPC strategy

对比分析图 7 (a)、(b) 可知,PI 控制下的三级联 H 桥多电平逆变器实际输出电流与参考电流在幅值和相位上都存在较大偏差,输出电流对指令电流的追踪效果较差。而在 MPC 下,二者波形基本重合。可以看出,MPC 相较传统 PI 控制能够更加精确地实现多次谐波的无静差跟踪。

为了验证基于 MPC 的有源消弧方法对故障电流的抑制效果,搭建有源消弧系统仿真模型,分别模拟过渡电阻 R_d 为 10 Ω 、20 Ω 、30 Ω 、50 Ω 、100 Ω 时的单相接地故障,并与基于 PI 控制的消弧效果进行对比,结果如图 8—图 12 所示。

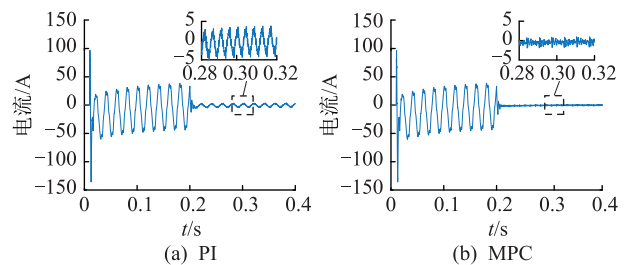


图 8 单相接地故障残流 ($R_d = 10 \Omega$)

Fig.8 Single-phase grounding fault residual current with R_d of 10 Ω

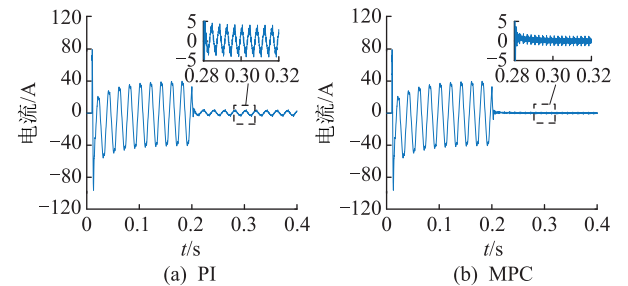


图 9 单相接地故障残流 ($R_d = 20 \Omega$)

Fig.9 Single-phase grounding fault residual current with R_d of 20 Ω

2 种控制策略下消弧后的接地残流幅值见表 3。可知,文中方法针对不同过渡电阻情况下的单相接

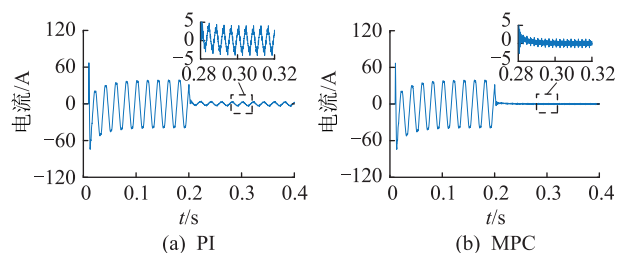


图 10 单相接地故障残流 ($R_d = 30 \Omega$)

Fig.10 Single-phase grounding fault residual current with R_d of 30Ω

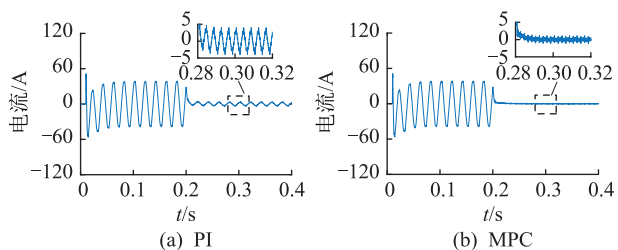


图 11 单相接地故障残流 ($R_d = 50 \Omega$)

Fig.11 Single-phase grounding fault residual current with R_d of 50Ω

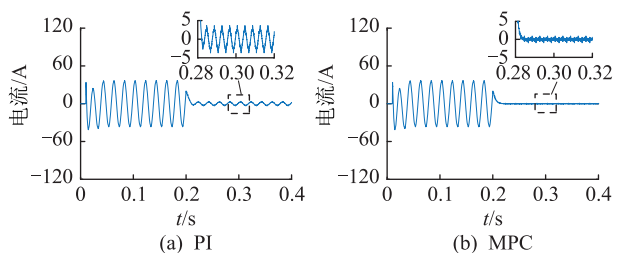


图 12 单相接地故障残流 ($R_d = 100 \Omega$)

Fig.12 Single-phase grounding fault residual current with R_d of 100Ω

地故障都有着更为优异的补偿效果,同时与基于 PI 控制的有源消弧系统相比较,文中方法拥有更高的接地电流抑制性能,更加有利于故障电弧可靠熄灭。

表 3 不同接地电阻下的单相接地故障残流

Table 3 Single-phase grounding fault residual currents under different grounding resistances

控制策略	R_d/Ω	基波残流/A	5次谐波残流/A	7次谐波残流/A
PI	10	2.973	0.278	0.218
	20	2.994	0.156	0.161
	30	2.976	0.107	0.123
	50	2.912	0.070	0.081
	100	2.684	0.030	0.043
MPC	10	0.125	0.030	0.053
	20	0.068	0.010	0.036
	30	0.067	0.010	0.024
	50	0.077	0.010	0.019
	100	0.073	0.002	0.001

4 实验验证

为了验证文中所提有源消弧控制算法的有效性,设计一套有源消弧装置用于实验验证,实验系统具体参数如表 4 所示。

表 4 实验参数

Table 4 Experimental parameters

实验模块	参数	数值
有源消弧装置	直流侧电压/V	80
	开关频率/kHz	15
	采样频率/kHz	15
	滤波电感/mH	9
	H 桥级联数量	3
配电网	交流侧电压/V	120
	基准功率/(V·A)	2 000
	单相对地电容/ μF	3.83
	单相对地泄漏电阻/k Ω	10.45

装置包括有源消弧系统和配电网模拟系统两部分,其中有源消弧系统采用整流电路作为前级电源,采用三级联 H 桥多电平逆变器作为主拓扑。控制系统设计部分还包括锁相环电路、过压过流保护电路等。

利用该配电网模型模拟电力系统单相接地故障,该模型一共包含 6 条馈线,模拟故障发生在第 1 条馈线 A 相的末端,故障发生 110 ms 后投入有源消弧装置,对故障接地电流进行分析可知,该单相接地故障电流中基波电流分量为 3.52 A,5 次谐波分量为 0.32 A,7 次谐波分量为 0.20 A,总谐波畸变率为 14.25%。

图 13—图 15 为配电网发生单相接地故障后,分别采用 2 种不同的控制方法进行有源消弧后单相接地故障点的故障残流波形。由图 13—图 15 对比分析可知,MPC 方法相较于传统 PI 控制方法能精确地追踪指令电流,抑制接地点的残流。

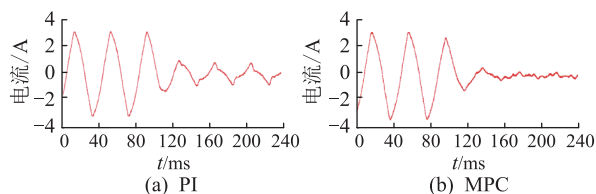
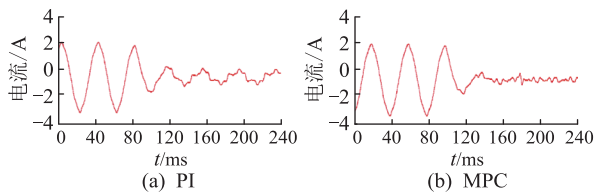
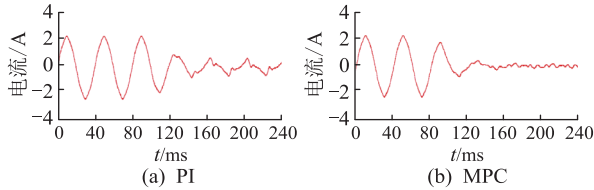


图 13 单相接地故障残流 ($R_d = 5 \Omega$)

Fig.13 Single-phase grounding fault residual current with R_d of 5Ω

对接地点残流采用电能质量分析仪进行分析,消弧后的接地残流幅值如表 5 所示。由表 5 可知,采用 MPC 方法对接地点故障电流进行补偿后,故障点

图 14 单相接地故障残流 ($R_d=51 \Omega$)Fig.14 Single-phase grounding fault residual current with R_d of 51Ω 图 15 单相接地故障残流 ($R_d=101 \Omega$)Fig.15 Single-phase grounding fault residual current with R_d of 101Ω

残流基波和谐波幅值均明显更低,表明 MPC 方法能使接地点故障残流更接近于 0,有助于快速熄弧。

表 5 不同接地电阻下的故障消弧效果

Table 5 Fault arc suppression effect under different grounding resistances

控制策略	R_d/Ω	基波残流/A	5次谐波残流/A	7次谐波残流/A
PI	5	0.318	0.185	0.052
	51	0.232	0.102	0.024
	101	0.158	0.100	0.021
MPC	5	0.084	0.095	0.036
	51	0.032	0.042	0.022
	101	0.023	0.025	0.015

5 结语

在消弧线圈的基础上引入有源补偿系统有助于进一步抑制配电网单相接地故障时的电弧,但控制策略的参数整定较为复杂且难以适应复杂变化的场景。文中选取三级联 H 桥多电平逆变器作为有源消弧系统主拓扑,设计了基于 MPC 的有源补偿控制系统,无须控制参数整定,简化了控制系统的设计。通过仿真分析与实验验证,表明 MPC 较 PI 控制具有更好的动态性能以及更高的精度,能够将接地故障电流抑制在较低水平,促进电弧的可靠熄灭,提升配电网发生单相接地故障时的供电可靠性。

参考文献:

[1] 刘健,张志华,张小庆. 配电网故障处理若干问题探讨[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(20):1-6.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing. Investigation on fault processing for electric power distribution networks [J].

Power System Protection and Control,2017,45(20):1-6.

- [2] 刘宝稳,马宏忠,沈培锋,等. 新型接地故障基波电流全补偿柔性控制系统[J]. 中国电机工程学报,2016,36(9):2322-2330.
LIU Baowen, MA Hongzhong, SHEN Peifeng, et al. New flexible control system of full compensation single-phase ground fault fundamental current [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9):2322-2330.
- [3] 杨磊,曾祥君,喻锴,等. 新型谐振接地系统接地故障全补偿方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):57-62.
YANG Lei, ZENG Xiangjun, YU kun, et al. A new method of full compensation for earth fault of resonance earth system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11):57-62.
- [4] 谢菁,薛永端,徐丙垠. 小电流接地系统不对称电压有源补偿控制方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(5):115-121.
XIE Jing, XUE Yongduan, XU Bingyin. An active compensation and control method of asymmetrical voltage in non-solidly grounded system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5):115-121.
- [5] 吕涛,邵文权,程远,等. 配电网有源消弧深度补偿的分析与仿真研究[J]. 智慧电力,2018,46(4):33-38.
LYU Tao, SHAO Wenquan, CHENG Yuan, et al. Analysis and simulation research on full compensation of distribution network active arc-suppression [J]. Smart Power, 2018, 46(4):33-38.
- [6] 游建章,郭谋发,蔡文强,等. 配电网单相接地故障柔性自适应消弧新方法[J]. 电力自动化设备,2022,42(4):146-153.
YOU Jianzhang, GUO Moufa, CAI Wenqiang, et al. Novel flexible and adaptive arc suppression method for single-phase grounding fault in distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4):146-153.
- [7] 李浩原,周国梁,王刚,等. 柔直电网阀侧单相接地故障过电压产生及影响因素研究[J]. 电力工程技术,2021,40(4):34-41.
LI Haoyuan, ZHOU Guoliang, WANG Gang, et al. Analysis of single-phase-to-ground fault overvoltage at the valve-side of HB-MMCs in bipolar HVDC systems [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4):34-41.
- [8] 李晖,张文海,陈坤燚,等. 计及故障距离的配电网单相接地有源消弧法[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(9):67-73.
LI Hui, ZHANG Wenhai, CHEN Kunyi, et al. Active arc-suppression method for single-phase-to-ground fault of distribution network considering fault distance [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(9):67-73.
- [9] 曾祥君,王媛媛,李健,等. 基于配电网柔性接地控制的故障消弧与馈线保护新原理[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):137-143.
ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing & feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16):137-143.
- [10] WANG W, ZENG X J, YAN L J, et al. Principle and control

- design of active ground-fault arc suppression device for full compensation of ground current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6):4561-4570.
- [11] 宋文胜, 蒋蔚, 刘碧, 等. 单相级联 H 桥整流器简化模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4):1127-1138.
SONG Wensheng, JIANG Wei, LIU Bi, et al. Single-phase cascaded H-bridge rectifiers simplified model predictive current control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4):1127-1138.
- [12] 杨勇, 樊明迪, 谢门喜, 等. 三电平三相逆变器快速有限控制集模型预测控制方法[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(8):83-91.
YANG Yong, FAN Mingdi, XIE Menxi, et al. Fast finite control set model predictive control method for three-level three-phase inverters[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(8):83-91.
- [13] 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.
- [14] 朱占春, 闻生学, 唐金锐, 等. 计及配电线路参数影响的有源消弧算法分析与改进[J]. 中国电力, 2021, 54(3):149-158.
ZHU Zhanchun, WEN Shengxue, TANG Jinrui, et al. Analysis and improvement of active arc suppression algorithm considering effect of distribution line parameters[J]. Electric Power, 2021, 54(3):149-158.
- [15] 郭谋发, 陈静洁, 张伟骏, 等. 基于单相级联 H 桥逆变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.
GOU 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.
- [16] 韩金刚, 李超, 杨腾飞, 等. 级联多电平并网逆变器简化模型预测控制研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(7):28-31.
HAN Jingang, LI Chao, YANG Tengfei, et al. Research on simplified model predictive control of a grid-connected multilevel cascaded inverter[J]. Power Electronics, 2016, 50(7):28-31.
- [17] 彭沙沙, 曾祥君, 喻琨, 等. 基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20):142-149.
PENG Shasha, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Active arc-suppression method of grounding fault for distribution network based on secondary injection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20):142-149.
- [18] 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.
- [19] 喻泉, 曾祥君, 喻琨, 等. 基于对地参数双端测量及闭环控制的配电网柔性接地有源消弧方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(3):1011-1021.
YU Quan, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Flexible-grounding active arc-suppression method for distribution network based on double-end measurement of ground parameters and closed-loop control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3):1011-1021.
- [20] 负保记, 马柯翔, 司渭滨, 等. 配电网单相接地故障的柔性熄弧装置[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19):124-134.
YUN Baoji, MA Kexiang, SI Weibin, et al. Flexible arc extinguishing device for a single-phase ground fault in a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19):124-134.
- [21] 王鹏, 冯光, 王晗, 等. 基于 PWM 可控变换器的接地残流全补偿控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18):110-118.
WANG Peng, FENG Guang, WANG Han, et al. A residual current compensation control method based on a PWM-controlled converter[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18):110-118.
- [22] 曾祥君, 卓超, 喻琨, 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):1523-1534.
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):1523-1534.
- [23] 张建坡, 胡子为, 闫语. MMC-HVDC 改进模型预测控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7):2363-2373.
ZHANG Jianpo, HU Ziwei, YAN Yu. Research of improved model predictive control strategy for MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7):2363-2373.
- [24] 涂春鸣, 侯玉超, 郭祺, 等. 计及配电网线路阻抗影响的自适应接地故障消弧控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8):163-171.
TU Chunming, HOU Yuchao, GUO Qi, et al. Adaptive arc suppression control strategy for grounding fault considering influence of line impedance in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8):163-171.
- [25] 李金东, 王勇, 王猛, 等. 基于二次扰动的配电网单相接地故障有源电流消弧方案[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(12):72-78.
LI Jindong, WANG Yong, WANG Meng, et al. An active current arc suppression method for single-phase grounding faults

- in the distribution network based on secondary current disturbance[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(12): 72-78.
- [26] 李建林,丁子洋,刘海涛,等. 构网型储能变流器及控制策略研究[J]. *发电技术*, 2022, 43(5): 679-686.
- LI Jianlin, DING Ziyang, LIU Haitao, et al. Research on grid-forming energy storage converters and control strategies [J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(5): 679-686.
- [27] 魏昂,王丹,武文杰,等. 降低不平衡电网下 PWM 整流器开关频率的顺序模型预测直接功率控制方法[J]. *电网技术*, 2021, 45(7): 2700-2708.
- WEI Ang, WANG Dan, WU Wenjie, et al. Sequential model predictive control to reduce the switching of PWM rectifier under unbalanced grid-side conditions [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(7): 2700-2708.
- [28] 刘广思,肖先勇,刘建鑫. 无差拍优化 T 型三电平 APF 模型预测电流控制[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(5): 78-84.
- LIU Guangsi, XIAO Xianyong, LIU Jianxin. Model predictive current control algorithm with deadbeat optimization for T-type three-level APF [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(5): 78-84.
- [29] 谷晴,李睿,蔡旭,等. 面向百兆瓦级应用的电池储能系统拓扑与控制方法[J]. *发电技术*, 2022, 43(5): 698-706.
- GU Qing, LI Rui, CAI Xu, et al. Topology and control method of battery energy storage system for application at the scale of hundreds of megawatts [J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(5): 698-706.
- [30] 陈豪,王法,倪瑞君,等. 基于空间矢量 PWM 的多电平 NPC 功率变流器电压平衡控制[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(8): 30-39.
- CHEN Hao, WANG Fa, NI Ruijun, et al. Voltage balance control of multi-stage NPC power converter based on space vector PWM [J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(8): 30-39.

作者简介:



常新建

常新建(1996),男,硕士在读,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用(E-mail: 191091881@qq.com);

邵文权(1978),男,博士,教授,研究方向为电力系统继电保护等;

程远(1985),男,博士在读,讲师,研究方向为模块化多电平变换器等。

Active arc suppression of a single-phase grounding fault in distribution network based on model predictive control

CHANG Xinjian¹, SHAO Wenquan¹, CHENG Yuan¹, WEI Xiaohui²

(1. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Company Xi'an Electric Power Supply Company, Xi'an 710032, China)

Abstract: In view of the existence of single-phase grounding fault arc suppression in the non-effective grounding system of distribution network, the combination of additional active compensation and arc suppression coil is often used to suppress the grounding fault arc, and the performance of active compensation system control strategy directly determines the arc suppression performance. An active arc suppression scheme based on model predictive control (MPC) is designed. Firstly, the principle of active arc suppression using injection current mode is analyzed. Then, the active arc suppression system topology of three-cascaded H-bridge multilevel inverter is adopted, and the cost function is optimized. The active arc suppression closed-loop control system based on MPC is designed. Compared with the active arc suppression closed-loop control system based on proportional integral (PI) control, the control system proposed can achieve accurate tracking of multiple harmonic currents without parameter tuning, which effectively compensates the grounding current. Simulation and experimental results show that the proposed scheme can suppress the grounding fault current more effectively and meet the requirements of reliable arc suppression in different scenarios.

Keywords: cascaded H-bridge; single-phase grounding fault; arc suppression coil; model predictive control (MPC); current injection; active arc suppression

(编辑 吴楠)