

基于背靠背 ANPC 的配电网柔性合环系统 建模研究

陈彪¹, 韩忠修², 马立强¹, 张仁和³

(1. 国网宁夏电力有限公司固原供电公司, 宁夏 固原 756000;

2. 国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏 南京 211106;

3. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001)

摘要: 背靠背有源钳位(ANPC)变换器作为配电网统一潮流控制器的核心部件,广泛应用于配电网柔性合环操作中。然而,ANPC变换器较多的开关器件和换流路径,增加了模型搭建的复杂程度。针对上述问题,提出一种ANPC变换器平均建模的方法,应用受控源等效替代法对开关器件替代,对各支路平均化的同时保留电路其他部分的阻、容、感等器件,显著简化了ANPC变换器电路模型。在此基础上,结合基于背靠背ANPC变换器的柔性合环控制原理,进一步搭建了背靠背ANPC柔性合环系统的平均模型。通过对比平均模型和开关模型的仿真结果,表明该平均模型在内部支路和外部特性上与开关模型保持一致,验证了所提出平均模型的正确性、准确性以及其在柔性合环系统应用的可行性。

关键词: 背靠背有源钳位变换器; 柔性合环; 受控源等效替代法; 平均模型

中图分类号: TM46 文献标识码: A DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqcd26023

Research on Modeling of Flexible Closed-loop System of Distribution Network Based on Back-to-Back ANPC

CHEN Biao¹, HAN Zhongxiu², MA Liqiang¹, ZHANG Renhe³

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd. Guyuan Power Supply Bureau, Guyuan 756000, Ningxia, China;

2. NARI Nanjing Control System Co., Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu, China;

3. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, Ningxia, China)

Abstract: The back-to-back active neutral-point-clamped (ANPC) converter, as the core component of the unified power flow controller of the distribution network, is widely used for the flexible closed-loop operation. However, the ANPC converter has more switching devices and commutation paths, which significantly increases the complexity of modeling. To solve the above problems, an average modeling method of the ANPC converter was proposed. The controlled source equivalent substitution method was used to replace the switching devices. The resistance-capacitance-inductance devices of other parts of the circuit were retained while averaging each branch, which greatly simplified the circuit model of the ANPC converter. On this basis, combined with the flexible control principle based on back-to-back ANPC converters, the average model of a back-to-back ANPC flexible control system was further built. By comparing the simulation results of the switch model and the average model, it was shown that the average model was consistent with the switch model in the internal branch and external characteristics, which verified the correctness and accuracy of the proposed average model and its feasibility in the application of flexible closed-loop system.

Key words: back-to-back active neutral-point-clamped (ANPC) converter; flexible closed-loop; controlled-source equivalent substitution method; average model

基金项目: 国网宁夏电力有限公司科技项目(5229GY230003)

作者简介: 陈彪(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为配电网运行与建模, Email: eleclab76@126.com

通讯作者: 韩忠修(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为交直流配电网仿真, Email: hanzhongxiu@sgepri.sgcc.com.cn

随着智能电网建设的推进,当配电网进行网络重构、负荷转移和设备线路检修时,需要通过合环操作的方法实现配电网不停电负荷转供^[1-3]。配网统一潮流控制器(distribution unified power flow controller, D-UPFC)具有电压调节、串联补偿、移相等功能,广泛应用于配电网的柔性合环操作^[4]。D-UPFC一般采用背靠背式电压源型变换器的结构,在中压配电网中,电压源型变换器多采用三电平拓扑^[5-6]。

三电平变换器的拓扑结构有二极管钳位型(neutral-point-clamped, NPC)、飞跨电容型以及有源中点钳位型(active neutral-point-clamped, ANPC)等^[7-8]。ANPC型三电平变换器由NPC型衍生而来,将每相桥臂的两个二极管替换为全控型器件,能够引入更多换流路径,实现开关管损耗均匀分布与功率平衡^[9]。因此,背靠背 ANPC 变换器是目前 D-UPFC 广泛采用的拓扑结构。然而,ANPC 变换器的开关器件数量较多,例如三相 ANPC 变换器具有 18 个开关器件,同时变换器的换流路径复杂,使得配电网柔性合环系统的搭建和仿真速度受到制约,不适合分布式集群部署及集群仿真^[10]。因此,需要通过平均建模对电路合理简化。

平均建模能够简化系统内部的开关动作过程而保留其对外特性,由于不再关注电力电子变换器内部特征,具有更好的通用性和仿真速度^[11]。根据建模方法的不同可分为状态空间平均法和电路平均法^[12]。状态空间平均法一般是对电路中的状态变量线性化和平均化,为系统控制设计和分析带来便利,但存在物理意义不明确的问题^[13];受控源等效替代法是电路平均法的一种,一般是在电路结构的基础上,用受控源替代开关器件并保留其余电路元件,需要对电路重新建模^[14]。文献[15]提出基于统一潮流控制器的配电网经济运行技术,实现了柔性合环过程中零电流分合闸操作以及实时优化重构配网结构。文献[16]基于电路原理和电磁合环操作方式,推导出 10 kV 电网合环稳态电流计算模型,并提出了两种电磁合环操作安全性评估方法,对指导合环电流计算具有较强的实用性。文献[17]全面考虑电网结构、负载分布、开关状态等多种因素,建立了考虑主网等值电路、计及变压器非标准变比电路的 10 kV 配网典型合环等值网络,并基于此提出了 3 种合环电流计算方法。文献[18]以受控电压源代替桥臂,提出两电平电压源型换流器与模块化多电平

换流器的通用型平均值模型。文献[19]用占空比替代离散的脉冲信号,提出了一种平均开关周期的模型。文献[20]基于等效受控源法,提出一种 T 型三电平通用平均电路模型。然而目前尚无针对 ANPC 变换器平均等效建模的方法。

本文针对配电网柔性合环系统,首先基于受控源等效替代法,提出一种 ANPC 变换器的平均建模方法,利用受控源表征变换器的输出特性,保留了其他部分的阻、容、感电路元件,然后结合柔性合环控制原理,构建基于背靠背 ANPC 柔性合环系统的平均模型和开关模型,同时在 Matlab/Simulink 中进行对比仿真。最后结果表明,所提平均模型在 ANPC 变换器内部桥臂特性、柔性合环电流、线路潮流控制方面,与开关模型保持一致,验证了该平均模型的正确性、准确性以及其在柔性合环系统应用的可行性,对柔性合环系统特性的全面评估具有参考意义。

1 基于背靠背 ANPC 变换器的柔性合环系统

在中压配电网进行合环操作时,由于两配电母线电压之间存在幅值和相位差,使合环瞬间产生较大冲击电流,稳定后线路中形成较大环流,引起线路过电流保护动作,导致合环失败。在两配电母线之间安装基于 D-UPFC 的柔性合环装置,其效果等效于插入一个恒频、幅值和相位可控的电压源,通过柔性合环装置中的背靠背变换器产生前后电压差并耦合到线路中,能够有效控制线路中的环流,保障合环顺利完成,并且可以通过改变背靠背变换器补偿电压的幅值和相位,改变配电母线两端电压的幅值和相位差,使线路中的潮流分布发生改变。

1.1 基于 D-UPFC 的柔性合环系统拓扑

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)作为一种新型的潮流控制装置,功能强大,是柔性交流输电系统(flexible AC transmission systems, FACTS)中结构相对复杂的一种,主要由两个全控型的电压源变换器背靠背组成。在 UPFC 中,串联侧变换器通过串联侧变压器,将幅值和相位可调的电压耦合到线路中,能够实现串联补偿、母线电压调节、移相调节和潮流综合控制功能;并联侧变换器向串联侧提供所需的有功功率,维持直流电压稳定,并通过与并联侧变压器进行无功功率的交换,来维持接入点电压的

恒定。

基于UPFC的功能特点,将其应用于配电网柔性合环系统,致力于解决配电网柔性合环问题和潮流分布问题,其中并联变换器和串联变换器均采用电压源型变换器,能够灵活改变其输出电压的幅值和相位,图1是基于D-UPFC的柔性合环系统拓扑。

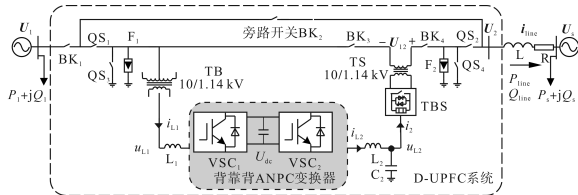


图1 10 kV 配电网的D-UPFC柔性合环系统拓扑
Fig.1 D-UPFC flexible closed-loop system topology of 10 kV distribution network

由图1可知,10 kV 配电网的D-UPFC柔性合环系统主要由合环开关BK₁、旁路开关BK₂、线路开关BK₃和BK₄、隔离开关QS₁和QS₂、接地开关QS₃和QS₄、避雷器F₁和F₂、并联变压器TB、串联变压器TS、低压晶闸管快速旁路开关TBS以及背靠背ANPC变换器组成。 U_1 、 U_s 分别为配电母线两端电压, P_1+jQ_1 和 P_s+jQ_s 分别为两端负荷, U_{12} 为D-UPFC补偿电压, R 和 L 分别为等效线路电阻和电感。

为了便于对柔性合环的工作原理进行分析,搭建其等效电路,如图2所示。

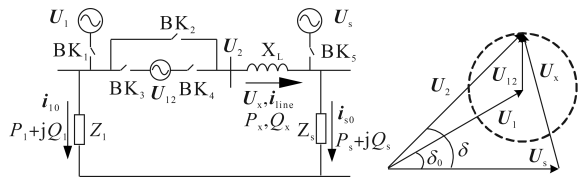


图2 配电网柔性合环等效电路图
Fig.2 Flexible closed-loop equivalent circuit diagram of a distribution network

图2中, U_{12} 为D-UPFC串联侧变换器耦合到线路中的等效电压; δ_0 为未加入 U_{12} 时、后端电压 U_1 和 U_s 之间的角度差; δ 为 U_2 和 U_s 之间的角度差; Z_1 为 U_1 侧负载; Z_s 为 U_s 侧负载; i_{10} 和 i_{s0} 分别为流经 Z_1 和 Z_s 的负荷电流。

当配电网正常运行时,BK₁和BK₅闭合,BK₂,BK₃,BK₄断开,配电母线两端电源分别为各自的负载进行供电,两电源之间的线路开关处于未闭合的状态,即配电网常见的供电方式:闭环设计,开环运行。当配电网中电源 U_s 计划检修或出现故障需要切除时,需要进行柔性合环:首先闭合

BK₃和BK₄,通过柔性合环装置产生幅值和相位可连续调节的电压 U_{12} 并耦合到输电线路中,减小配电线路两端的电压差值,实现合环时非常小的冲击电流甚至无冲击电流,然后断开BK₅,切除电源 U_s ,实现负荷 Z_2 的不停电转供,最后如果电源 U_s 检修时间较长,可经过控制调节后,将BK₂闭合,BK₃和BK₄断开,使柔性合环系统退出。

通常情况下,合环处的电压相位差不超过 15° ,电抗远远大于电阻,故忽略线路电阻的影响。由图2可得:

$$i_{line} = \frac{U_2 - U_s}{X_L} = \frac{U_1 + U_{12} - U_s}{X_L} \quad (1)$$

$$P_x = \frac{U_2 U_s \sin\delta}{X_L} = \frac{(U_1 + U_{12}) U_s \sin\delta}{X_L} \quad (2)$$

$$Q_x = \frac{U_2 U_s \cos\delta - U_s^2}{X_L} = \frac{(U_1 + U_{12}) U_s \cos\delta - U_s^2}{X_L} \quad (3)$$

由式(1)~式(3)可知,合环线路电流、线路有功功率和无功率大小均与补偿电压 U_{12} 有关,因此通过控制耦合到线路中 U_{12} 的幅值和相位,可以有效减小合环冲击电流,控制线路潮流分布情况。

1.2 背靠背ANPC变换器的控制方法

对于D-UPFC柔性合环中电压源型变换器,控制方式较为多样,但为了使控制具有良好的动态特性和静态特性,本文选择基于比例积分调节器的电压、电流双闭环控制结构。电压外环的差值经过PI调节器产生电流内环的参考值,电流内环实现变换器对于电流参考值的跟踪,图3为三相ANPC变换器的拓扑结构,其中 e_a, e_b, e_c 为三相母线电压; u_{ac}, u_{bc}, u_{cc} 为变换器交流侧输出电压; i_a, i_b, i_c 为变换器交流侧输出电流; L 为滤波电感; C_1 和 C_2 为直流侧电容。

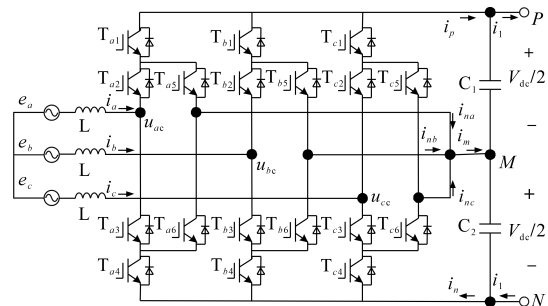


图3 三相ANPC三电平变换器拓扑

Fig.3 Topology of the three-phase ANPC three-level converter

为了方便对ANPC变换器进行分析和控制,在对三相交流系统进行数学建模时,考虑到控制

环路以及数学计算的复杂,采用 Clark 变换和 Park 变换,将变换器的数学模型从三相静止 $a-b-c$ 坐标系的交流量变换成两相同步旋转的 $d-q$ 坐标系下的直流量。在基于 D-UPFC 的柔性合环系统中,整流侧变换器的主要功能是维持并网点母线电压和直流电容电压的稳定,逆变侧变换器的主要功能是控制配电线路中潮流分布,并结合三电平变换器矢量控制原理,得到具有线路综合调节能力的并联侧和串联侧控制框图,如图 4、图 5 所示。

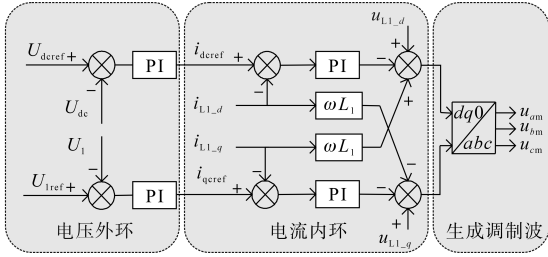


图 4 具有并网点电压稳定的并联侧控制框图

Fig.4 Parallel side control block diagram with grid point voltage stability

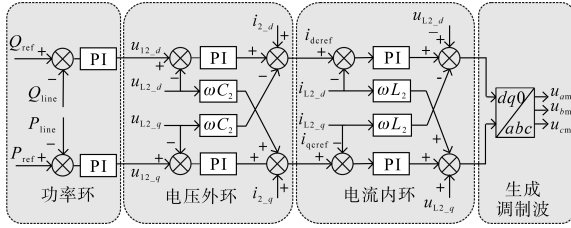


图 5 具有潮流综合调节的串联侧控制框图

Fig.5 Series side control block diagram with power flow comprehensive regulation

在并联侧变换器控制框图中, U_{dcref} 为并联侧变换器目标直流电压, U_{1ref} 为并网点目标电压, 直流电压差值经过 PI 控制器产生参考值 i_{dcref} , 并网点电压差值经过 PI 控制器产生参考值 i_{qref} , 以维持直流电压和并网点电压的稳定; 在串联侧变换器控制框图中, $u_{12,d}$ 和 $u_{12,q}$ 为串联侧变换器目标补偿电压 U_{12} 的 d 轴和 q 轴分量, 功率外环分别产生其目标值, 进一步通过控制补偿电压 U_{12} 的 d 轴分量来控制线路无功功率 Q_{line} , q 轴分量来控制线路的有功功率 P_{line} 。

1.3 ANPC 变换器的调制策略

ANPC 变换器主要采用脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM), 其中包含正弦脉宽调制法 (sinusoidal pulse width modulation, SPWM)、空间矢量调制法和特定谐波消除法等。SPWM 通过比较三角载波与归一化后的正弦调制波大小, 得出一系列高度相等而宽度不等的矩形脉冲信号。

该控制方式实现较为容易并且响应速度快, 故本文采用三角波同相层叠 SPWM 调制策略。

图 6 为三角波同相层叠调制示意图以及 A 相各开关管的脉冲信号, 其中“1”表示导通, “0”表示关断, u_{am} 为归一化后的调制波。

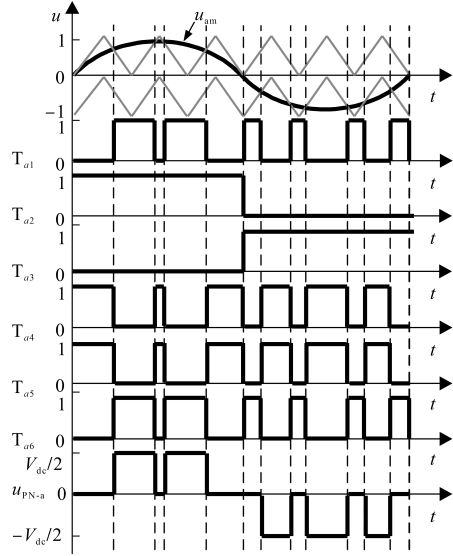


图 6 三角波同相层叠调制示意图

Fig.6 Schematic diagram of triangular wave in-phase cascade modulation

假设 T_{xk} 表示 x 相第 k 个开关管 ($x=a, b, c; k=1, 2, 3, 4, 5, 6$), 通过分析图 6 中开关管的导通情况, 可以得出开关管之间的关系: T_{a1} 和 T_{a5} 互补导通, T_{a2} 和 T_{a3} 互补导通, T_{a4} 和 T_{a6} 互补导通。同时为了保证每个状态下开关管所承受的电压应力相同, 使 T_{x1} 和 T_{x6} 信号保持一致, T_{x4} 和 T_{x5} 信号保持一致。

2 背靠背 ANPC 变换器的平均模型

2.1 ANPC 变换器的平均模型

假设 s_{xk} 是开关管 T_{xk} 的开关状态, $s_{xk}=1$ 代表导通, $s_{xk}=0$ 代表关断。根据图 3 中电路节点电压和电流关系可得变换器交流侧 x 相的电感电流动态方程:

$$L \frac{di_x}{dt} = e_x - u_x \quad (4)$$

交流侧 x 相的输出电压:

$$u_{xc} = u_{c1} s_{x1} s_{x2} s_{x6} + (s_{x2} s_{x4} s_{x5} + s_{x1} s_{x3} s_{x6}) u_{c2} + u_n \quad (5)$$

直流侧的电流 i_p :

$$i_p = i_a d_{a1} d_{a2} d_{a6} + i_b d_{b1} d_{b2} d_{b6} + i_c d_{c1} d_{c2} d_{c6} \quad (6)$$

另外, 直流侧上、下两电容的电压动态方程为

$$C_1 \frac{du_{C1}}{dt} = i_p - i_1 \quad (7)$$

$$C_2 \frac{du_{C2}}{dt} = i_n - i_1 \quad (8)$$

设 d_{xk} 为开关管 T_{xk} 的占空比,则由图6可得以下关系:

$$\begin{cases} d_{x1} + d_{x5} = 1 \\ d_{x2} + d_{x3} = 1 \\ d_{x4} + d_{x6} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$d_{x1} = \begin{cases} u_{xm} + 1 & u_{xm} < 0 \\ u_{xm} & u_{xm} \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$d_{x2} = \begin{cases} 0 & u_{xm} < 0 \\ 1 & u_{xm} \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

结合图6和式(9)可知,通过ANPC变换器每相 T_{x1}, T_{x2} 的导通情况,便可以计算出其余4个开关管的导通情况。

将式(10)、式(11)代入式(5)中,用开关管的占空比 d_{xk} 替代开关状态 s_{xk} ,整理后可得:

$$\bar{u}_{xc} = \bar{u}_{C1} d_{x1} d_{x2} - (1 + 2d_{x1} d_{x2} - d_{x1} - d_{x2}) \bar{u}_{C2} + \bar{u}_m \quad (12)$$

另外,结合式(9)~式(11),可以得到式(4)、式(6)~式(8)的平均表达式为

$$L \frac{d\bar{i}_p}{dt} = \bar{e}_x - \bar{u}_x \quad (13)$$

$$\bar{i}_p = \bar{i}_a d_{a1} d_{a2} + \bar{i}_b d_{b1} d_{b2} + \bar{i}_c d_{c1} d_{c2} \quad (14)$$

$$C_1 \frac{d\bar{u}_{C1}}{dt} = \bar{i}_p - \bar{i}_1 \quad (15)$$

$$C_2 \frac{d\bar{u}_{C2}}{dt} = \bar{i}_n - \bar{i}_1 \quad (16)$$

式中:带有上横线的字母代表平均值。

图7为ANPC变换器A相拓扑结构(开关模型)。当 $i_a > 0$ 时,该变换器为整流状态;当 $i_a < 0$ 时,为逆变状态。定义节点 a 和 O 之间电压为 u_{ao} ,上桥臂流过的电流为 i_{ap} ,下桥臂流过的电流为 i_{an} ,电压和电流的参考方向如图7中所示。

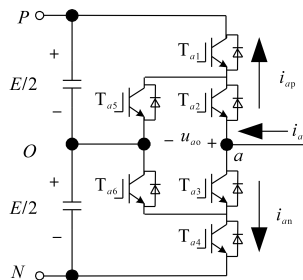


图7 ANPC变换器A相拓扑结构

Fig.7 A-phase topology of ANPC converter

ANPC变换器的工作模式有4种状态,如图8所示。其中有两种输出是0电平(O状态),另外

两种输出电平分别为 $+V_{dc}/2$ (P状态) 和 $-V_{dc}/2$ (N状态)。

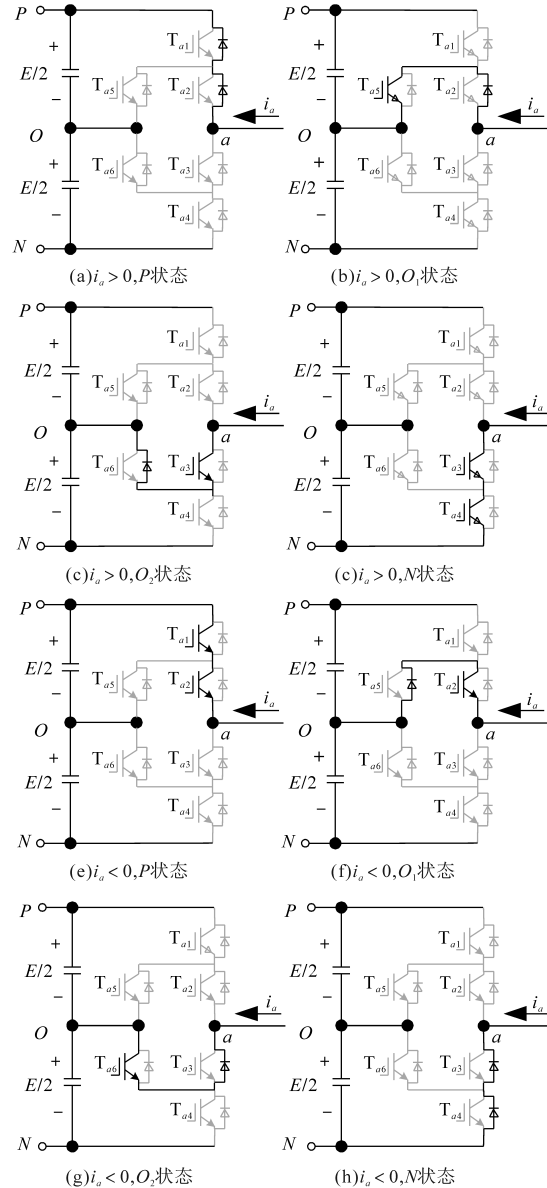


图8 ANPC三电平电路工作状态

Fig.8 The operating status of the three-level ANPC circuit

表1和表2总结了不同工作状态下,各个开关管的导通状态以及 u_{ao}, i_{ap}, i_{an} 的具体情况(假设各个开关管均为理想开关,无导通压降)。

表1 $i_a > 0$ 时,不同工作状态下电压和电流值

Tab.1 When $i_a > 0$, the voltage and current values under different working conditions

状态	T_{a1}	T_{a2}	T_{a3}	T_{a4}	T_{a5}	T_{a6}	u_{ao}	i_{ap}	i_{an}
P	1	1	0	0	0	1	$E/2$	i_a	0
O_1	0	1	0	1	1	0	0	0	0
O_2	1	0	1	0	0	1	0	0	0
N	0	0	1	1	1	0	$-E/2$	0	i_a

表2 $i_a < 0$ 时,不同工作状态下电压和电流值
Tab.2 When $i_a < 0$, the voltage and current values under different working conditions

状态	T_{a1}	T_{a2}	T_{a3}	T_{a4}	T_{a5}	T_{a6}	u_{ao}	i_{ap}	i_{an}
P	1	1	0	0	0	1	$E/2$	$-i_a$	0
O_1	0	1	0	1	1	0	0	0	0
O_2	1	0	1	0	0	1	0	0	0
N	0	0	1	1	1	0	$-E/2$	0	$-i_a$

由于 ANPC 不同状态下可以通过 T_{x1}, T_{x2} 推导出其余开关管的情况,并根据表 1 和表 2 中不同工作状态下开关管 T_{x1}, T_{x2} 的导通状态与 u_{ao}, i_{ap}, i_{an} 关系,用占空比替代开关函数,可以推导出如下控制关系:

$$\begin{cases} \bar{u}_{ao} = \frac{(d_{a1} + d_{a2} - 1)E}{2} \\ \bar{i}_{ap} = d_{a1}d_{a2}\bar{i}_a \\ \bar{i}_{an} = (1 - d_{a1})(1 - d_{a2})\bar{i}_a \end{cases} \quad i_a > 0 \quad (17)$$

$$\begin{cases} \bar{u}_{ao} = \frac{(d_{a1} + d_{a2} - 1)E}{2} \\ \bar{i}_{ap} = -d_{a1}d_{a2}\bar{i}_a \\ \bar{i}_{an} = -(1 - d_{a1})(1 - d_{a2})\bar{i}_a \end{cases} \quad i_a < 0 \quad (18)$$

式中: d_{a1}, d_{a2} 分别为 ANPC 变换器 A 相拓扑中开关 T_{a1}, T_{a2} 的占空比; E 为直流电压幅值; i_a 为 A 相的交流电流。

用一个受控电压源和两个受控电流源替代每相桥臂上的开关管,其中每个受控源的控制信号如式(17)、式(18)所示,即得到 ANPC 变换器 A 相的平均模型,如图 9 所示。当 ANPC 开关模型工作在表 1 和表 2 中不同工作状态时,只需要将该工作状态下开关管 T_{a1}, T_{a2} 对应的占空比信号 d_{a1}, d_{a2} 输入到受控源表达式中,ANPC 平均模型便可以输出该工作状态下的 u_{ao}, i_{ap}, i_{an} ,即具有与开关模型相同的工作状态和电压、电流特性。

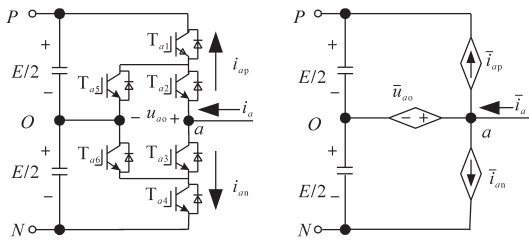


图9 ANPC 变换器 A 相的开关模型和平均模型

Fig.9 Switch model and average model of ANPC converter A phase

相比于 A 相 ANPC 开关模型,该平均模型仅由一个受控电压源和两个受控电流源组成,并且电压和电流受控源的表达式中只有 d_{a1} 和 d_{a2} 两个

变量,能够极大简化对变换器的分析。

2.2 背靠背 ANPC 变换器的平均模型

将 A 相平均模型拓展到三相系统中,并且将并联侧和串联侧连接起来,即得到背靠背 ANPC 变换器的平均模型,如图 10 所示,并联侧受控源的表达式如下式所示:

$$\begin{cases} \bar{u}_{ao} = \frac{(d_{a1} + d_{a2} - 1)E}{2} \\ \bar{i}_{ap} = d_{a1}d_{a2}\bar{i}_a \\ \bar{i}_{an} = (1 - d_{a1})(1 - d_{a2})\bar{i}_a \\ \bar{u}_{bo} = \frac{(d_{b1} + d_{b2} - 1)E}{2} \\ \bar{i}_{bp} = d_{b1}d_{b2}\bar{i}_b \\ \bar{i}_{bn} = (1 - d_{b1})(1 - d_{b2})\bar{i}_b \\ \bar{u}_{co} = \frac{(d_{c1} + d_{c2} - 1)E}{2} \\ \bar{i}_{cp} = d_{c1}d_{c2}\bar{i}_c \\ \bar{i}_{cn} = (1 - d_{c1})(1 - d_{c2})\bar{i}_c \end{cases} \quad (19)$$

串联侧受控源的表达式和并联侧大致相同,差别仅在于因电流 i_x 方向相反,所有受控电流源需添加负号。

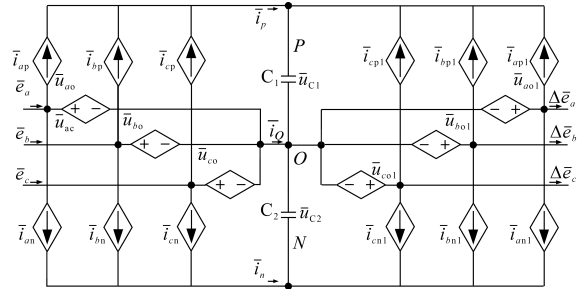


图 10 背靠背 ANPC 变换器平均模型

Fig.10 Average model of back-to-back ANPC converter

由图 10 可知,在背靠背 ANPC 变换器的平均模型中,仅将开关管用受控源代替,仍保留了电路中原有的阻、感、容器件,并且 ANPC 平均模型的 4 种工作状态与开关模型保持一致。因此,控制方法依然可以采用电压电流双闭环控制。

3 仿真验证

为了验证柔性合环操作中,背靠背 ANPC 变换器平均模型的正确性和准确性,在 Matlab/Simulink 环境下搭建了 D-UPFC 柔性合环系统仿真模型,其中背靠背 ANPC 变换器分别采用开关模型和平均模型,其余系统仿真步长、滤波器参数以及控制方法完全相同,具体仿真参数如表 3 所示。

表3 D-UPFC柔性合环系统仿真参数

参数	参考值	参数	参考值
系统仿真步长	1 μs	直流侧电容 $C_1=C_2$	4 000e-6 F
电压源 U_1	[10 kV 120° 50 Hz]	并联侧滤波器 L_1	130e-6 H
电压源 U_s	[10 kV 90° 50 Hz]	串联侧滤波器 L_2	130e-6 H
直流侧电压 U_{dc}	2 000 V	串联侧滤波器 C_2	1 000e-6 F
串联侧变压器TB	10e ³ /1 140	三角载波频率 f	10 kHz
并联侧变压器TS	10e ³ /1 140	—	—

中压配电网两端电压 U_1 和 U_s 幅值相同,线电压有效值均为10 kV, U_1 超前 U_s 相位30°,在柔性合环操作中,对比背靠背ANPC开关模型和平均模型电压、电流仿真结果,如图11所示,为了便于将开关模型和平均模型的仿真结果进行比较,对开关模型部分电压、电流进行滤波,降低高频分量,截止频率设置为1 kHz。

图11a是配电网线路两端电压 U_1 和 U_s 的A相波形,两者幅值相等, U_1 相位超前 U_s 相位30°;图11b是开关模型和平均模型补偿电压 U_{12} 的A相波形,其中实线代表开关模型,虚线代表平均模型,两条曲线一致,均能够准确产生线路两端电压 U_1 和 U_s 的差值,其中开关模型的曲线中含有开关频率为10 kHz的高频分量,图11c是开关模型和平均模型直流侧电压 U_{dc} 的波形对比,两者均能稳定到2 000 V,其中开关模型的直流电压在2 000 V上下有微小波动。由图11b、图11c可知,开关模型和平均模型输出的补偿电压 U_{12} 和直流侧电压 U_{dc} 均能达到给定值,并且开关模型和平均模型的电压曲线基本一致,仅有高次谐波的差异,即两个模型对外特性相同,表明背靠背ANPC变换器控制的可行性和有效性。

图11d~图11f分别是开关模型和平均模型并联侧变换器A相 i_{ap} , i_{an} , U_{ao} 的对比波形,图11g~图11i分别是开关模型和平均模型串联侧变换器A相 i_{ap} , i_{an} , U_{ao} 的对比波形,其中灰色阴影部分代表滤波后的开关模型,虚线代表平均模型。由图11d~图11i可知,经过截止频率为1 kHz的低通滤波器后,背靠背ANPC变换器开关模型的 i_{ap} , i_{an} , U_{ao} 波形,与平均模型的波形一致,即ANPC开关模型和平均模型在内部支路上的电压、电流特性相同。

当中压配电网两端电压的幅值和相位均不一致时,即 $U_1=[10\text{ kV }120^\circ\text{ 50 Hz}]$, $U_s=[9\text{ kV }100^\circ\text{ 50 Hz}]$,对比柔性合环操作中开关模型和平均模型电压、电流的仿真结果,如图12所示,对开关模

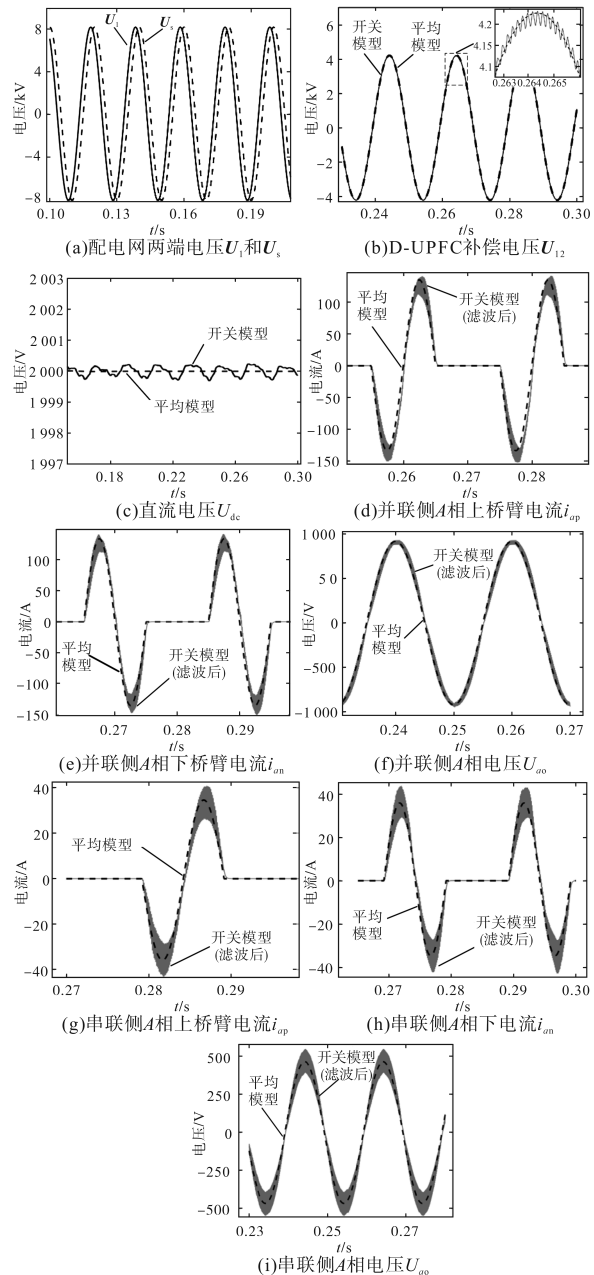


图11 背靠背ANPC变换器开关模型与平均模型仿真结果对比
Fig.11 Comparison of simulation results between switch model and average model of back-to-back ANPC converter

型部分电压、电流进行低通滤波处理,截止频率设置为1 kHz。

图12a是配电网线路两端电压 U_1 和 U_s 的A相波形,其中 U_1 超前 U_s 相位20°,同时 U_1 幅值高于 U_s ;图12b~图12c是开关模型和平均模型补偿电压 U_{12} 和直流电压 U_{dc} 的对比波形,其中实线代表开关模型,虚线代表平均模型;图12d~图12f是开关模型和平均模型内部桥臂电流、电压的对比波形,其中灰色阴影部分代表滤波后的开关模型,虚线代表平均模型。通过仿真结果表明,当配电网两端电压的幅值和相位均不一致时,该平均模

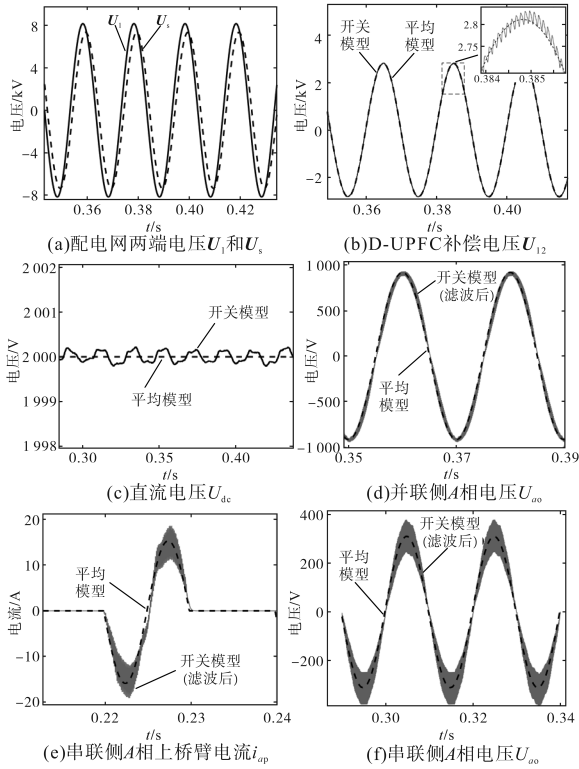


图12 U_1 和 U_s 幅值、相位均不同时开关模型与平均模型仿真结果对比

Fig.12 Comparison of simulation results between switch model and average model when the amplitude and phase of U_1 and U_s are different

型的仿真结果与开关模型一致,即该平均模型在外部特性和内部支路电压、电流特性方面,能够与开关模型保持一致。

分别仿真系统无D-UPFC合环、D-UPFC开关模型合环、D-UPFC平均模型合环3种情况,观察线路电流 i_{line} 的波形变化,如图13所示,其中实线代表开关模型,虚线代表平均模型。当系统无D-UPFC进行线路合环时,开关 BK_1, BK_2, QS_3, QS_4 闭合,由于线路两端电压之间存在相位差 U_{12} ,合环瞬间产生较大冲击电流,稳定时线路电流 i_{line} 幅值为193 A,可能超过线路电流阈值,造成柔性合环操作失败;当系统中通过D-UPFC进行线路合环时,开关 BK_1, BK_3, QS_1, QS_2 闭合,背靠背ANPC变换器产生线路两端电压差 U_{12} 并耦合到线路中,使开关模型和平均模型的合环冲击电流和线路电流 i_{line} 均被控制到较小值,其中平均模型线路电流 i_{line} 幅值为0.01 A,开关模型由于其补偿电压 U_{12} 存在高频分量,线路电流 i_{line} 幅值为0.06 A,两种模型均能够有效防止线路出现过电流情况,保证柔性合环操作的顺利完成。

进一步,对所搭建D-UPFC柔性合环系统的

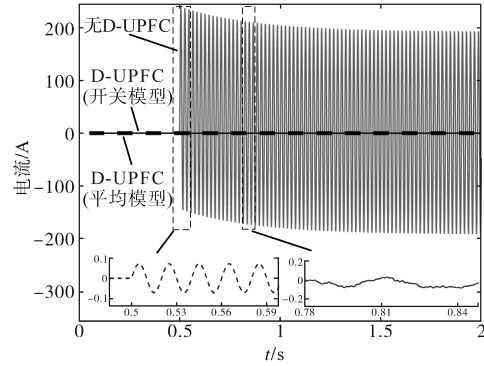


图13 系统0.5 s合环时线路电流 i_{line} 对比
Fig.13 Comparison of line current i_{line} when the system is closed for 0.5 s

潮流控制情况进行仿真,并将开关模型和平均模型的仿真结果进行对比,如图14所示,其中开关模型均用实线表示,平均模型均用虚线表示。系统控制过程包含以下几个阶段:

0 s—0.2 s: $BK_1, BK_2, BK_3, BK_4, QS_1, QS_2$ 断开, QS_3, QS_4 闭合,此时配电网两端电源给各自负荷供电,合环线路上无潮流流动,线路电流 i_{line} 为0 A。

0.2 s—0.5 s: BK_1, BK_2 闭合,线路合环,D-UPFC柔性合环装置未投入使用,由于 U_1 超前 U_s 相位 30° ,存在电压差,此时 U_1 侧向 U_s 侧流动有功功率 P_{line} 和无功功率 Q_{line} 。

0.5 s—1 s: BK_2, QS_3, QS_4 断开, BK_3, BK_4, QS_1, QS_2 闭合,D-UPFC柔性合环装置投入运行,此时令补偿电压 $U_{12}=U_s-U_1$,线路中无潮流流动,线路电流接近于0 A。

1 s—1.5 s:调整线路中的潮流分布,改变补偿电压 U_{12} 大小,使线路中有功功率为0 W,无功功率由 U_s 侧流向 U_1 侧。

1.5 s—2 s:继续调整线路中的潮流分布,改变补偿电压 U_{12} 大小,使线路中无功功率为0 var,有功功率由 U_s 侧流向 U_1 侧。

图14a~图14f是开关模型和平均模型在不同调控指令下,其线路潮流、补偿电压 U_{12} 以及线路电流 i_{line} 的变化情况。通过D-UPFC柔性合环系统潮流控制仿真结果可知,在多种调控目标下,背靠背ANPC变换器的开关模型和平均模型均能准确、迅速产生补偿电压 U_{12} 并耦合到线路中,控制合环后线路电流 i_{line} 大小以及改变线路潮流分布,并且通过对比线路潮流、补偿电压 U_{12} 以及线路电流仿真结果,两种模型的曲线保持一致,验证了背靠背ANPC变换器平均模型在柔性合环系

统中应用的可行性和替代性。

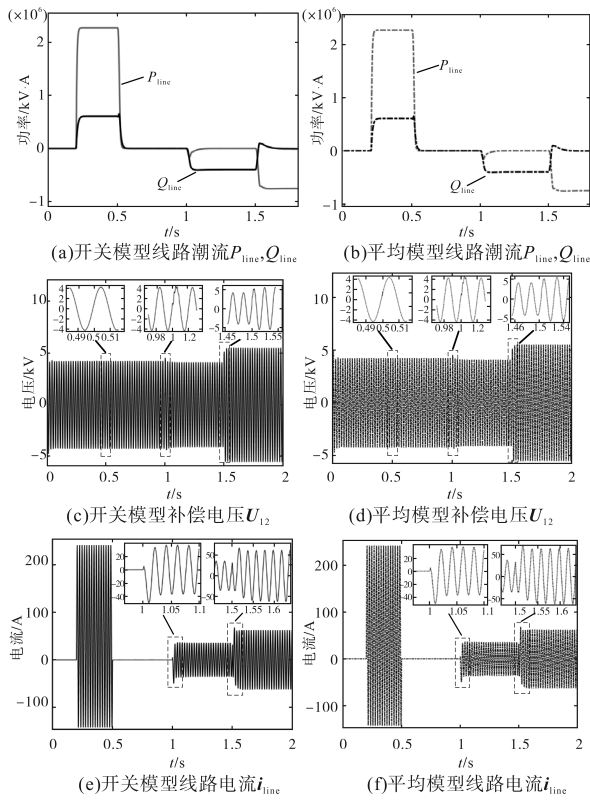


图14 D-UPFC柔性合环系统潮流控制仿真结果

Fig.14 Simulation results of power flow control of D-UPFC flexible closed loop system

4 结论

本文提出了一种应用于配电网柔性合环系统的三电平ANPC型受控源等效替代平均模型,通过对比该平均模型和开关模型在柔性合环以及潮流控制下内部和外部特性,得出如下结论:

1)在ANPC变换器的平均模型中,只用受控电压源和受控电流源对各个开关管进行平均处理,保留原电路中全部的阻、感、容等器件,将该方法推广到三相ANPC变换器,并进一步搭建了背靠背ANPC变换器的平均模型,拓扑内部的桥臂电压、电流以及变换器的控制方式与开关模型完全相同,能够实现对其快速建模和准确控制。

2)基于背靠背ANPC平均模型的柔性合环系统,能够在柔性合环以及潮流控制时,通过控制耦合到线路中的补偿电压,实现对线路合环电流和潮流分布的有效控制,并且在内部支路特性和外部特性上与开关模型一致,具有较强的适用性和替代性,可以用来对柔性合环系统特性进行全面评估。

在后续研究中,将通过增加该平均模型的应

用场景和实验验证,对其内、外部特性进行更全面的研究,反映真实电路的复杂性和不确定性,提高平均模型的准确性和可靠性。

参考文献

- [1] 徐玉韬,冯起辉,谈竹奎,等.考虑转供与重构协同的多端柔性互联配电网供电恢复策略[J].电工技术学报,2024,39(9):2696-2709.
XU Yutao, FENG Qihui, TAN Zhukui, et al. Optimal power restoration strategy for multi-terminal flexible interconnected distribution networks based on flexible interconnection device and network reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2696-2709.
- [2] 刘家军,王锐,谭雅岚,等.一种电网解列、并列与联络线潮流综合控制方法[J].电气传动,2020,50(8):100-106.
LIU Jiajun, WANG Kun, TAN Yalan, et al. An integrated control method of splitting, paralleling and tie-line power flow[J]. Electric Drive, 2020, 50(8): 100-106.
- [3] 周瑞.配电网新型合环调电技术研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.
ZHOU Rui. Research on new closed-loop power adjustment technology of distribution network[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023.
- [4] RIAHINASAB M, DEGHANI M, FATHOLLAHI A, et al. A brief overview of the application of unified power flow controller in power systems[J]. International Journal of Smart Electrical Engineering, 2023, 12(3): 183-191.
- [5] 张国驹,裴玮,杨鹏,等.中压配电网柔性互联设备的电路拓扑与控制技术综述[J].电力系统自动化,2023,47(6):18-29.
ZHANG Guoju, PEI Wei, YANG Peng, et al. Review on circuit topology and control technology of flexible interconnection devices for medium-voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 18-29.
- [6] GEORGILAKIS P S, HATZIARGYRIOU N D. Unified power flow controllers in smart power systems: models, methods, and future research[J]. IET Smart Grid, 2019, 2(1): 2-10.
- [7] 李永东,徐杰彦,杨涵棣,等.多电平变换器拓扑结构综述及展望[J].电机与控制学报,2020,24(9):1-12.
LI Yongdong, XU Jieyan, YANG Handi, et al. Overview and prospect of multilevel converter topology[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(9): 1-12.
- [8] 景巍,谭国俊,赵张飞.有源钳位三电平变频器调制策略及损耗分析[J].电气传动,2011,41(2):3-6.
JING Wei, TAN Guojun, ZHAO Zhangfei. Modulation strategy and loss analysis of active neutral point clamped three-level converter[J]. Electric Drive, 2011, 41(2): 3-6.
- [9] ZHOU Y, XU M, ZHANG Y, et al. Research and simulation of hybrid ANPC converter[C]//2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Hefei, China, 2023: 2399-2404.

- [10] YU F, LIN W, WANG X, et al. Fast voltage-balancing control and fast numerical simulation model for the modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 220-228.
- [11] YAN D, YANG C, HANG L, et al. Review of general modeling approaches of power converters[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2021, 7(1): 27-36.
- [12] 洪泽祺. 适用于多类型故障仿真的高压直流输电系统动态平均化建模方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2022.
HONG Zeqi. Research on dynamic average-value modeling method of line-commutated-converter-based high voltage direct current transmission system for multiple types of fault simulation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [13] 陈昭, 丁喜波. 基于状态空间平均法的非理想Boost变换器建模与控制研究[J]. 电子器件, 2021, 44(4): 893-896.
CHEN Zhao, DING Xibo. Research of modeling and control of non-Ideal Boost converter based on state space average method [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2021, 44(4): 893-896.
- [14] 吴文进, 苏建徽, 汪海宁, 等. 光伏并网逆变器受控源等效模型与谐振机理分析[J]. 太阳能学报, 2020, 41(1): 92-100.
WU Wenjin, SU Jianhui, WANG Haining, et al. Photovoltaic grid-connected inverter controlled source equivalent model and its resonance mechanism analysis[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(1): 92-100.
- [15] 葛雪峰, 魏然, 周科, 等. 基于UPFC的配网经济运行技术[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2585-2594.
GE Xuefeng, WEI Ran, ZHOU Ke, et al. UPFC-based economic operation of distribution network[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2585-2594.
- [16] 付轲, 蔡泽祥, 邱建, 等. 10 kV 电网电磁合环操作安全性评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(4): 71-76.
FU Ke, CAI Zexiang, QIU Jian, et al. Safety assessment methods of loop closing operation in 10 kV distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(4): 71-76.
- [17] 张开宇, 冯煜尧, 余颖辉, 等. 中压配电网合环电流计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 142-149.
ZHANG Kaiyu, FENG Yuyao, YU Yinghui, et al. Study of calculation of current induced by closing-loop operation in medium-voltage distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 142-149.
- [18] WANG W, LI B, HE J, et al. Coupling characteristics between MMC-HVDC and AC transmission lines on the same tower and their impact on protective relaying[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 159: 110000.
- [19] 张微微. Buck/Boost变换器与双向全桥DC/DC变换器级联系统建模及控制[D]. 合肥:合肥工业大学, 2020.
ZHANG Weiwei. Modeling and control of Buck/Boost and full-bridge bidirectional DC/DC cascade system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [20] 王建华, 骆芳芳, 季振东, 等. T型三电平变换器的通用PWM平均模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 573-581, 688.
WANG Jianhua, LUO Fangfang, JI Zhendong, et al. A unified PWM averaged model for T-type three-level converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 573-581, 688.

收稿日期:2024-06-26

修改稿日期:2024-08-11