

适应电力电子变压器功率双向交换的低电压穿越运行控制策略

孔祥平¹, 李 鹏¹, 韩杰祥², 张 哲², 尹项根²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要:针对交流电网故障导致机端电压跌落时电力电子变压器的运行特点, 该文提出一种适应 PET 功率双向交换的低电压穿越运行控制策略。在电压跌落期间, 根据正序电压跌落深度, 自动调整注入无功功率, 以协助电网电压恢复; 并根据电压跌落前 PET 有功传输情况, 在保证 PET 电流不越限的前提下, 最大程度保持有功传输的水平及方向, 减少对交直流电网的扰动。在电压不对称跌落情况下, 同时辅之以负序电流抑制控制, 以保证注入电网电流的对称性。最后, 通过仿真模型验证该低电压穿越运行控制策略的有效性。

关 键 词:电力电子变压器; 低电压穿越; 控制策略; 电流指令值

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2021.02.015 中图分类号: TM41 文章编号: 1673-9140(2021)02-0124-08

Low-voltage ride through strategy for bidirectional power electronic transformers

KONG Xiangping¹, LI Peng¹, HAN Jiexiang², ZHANG Zhe², YIN Xianggen²

(1. Electric Power Science Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In view of the operating characteristics of PET when the AC grid voltage sags, this paper proposes a LVRT strategy for bidirectional PET. During the voltage drop, the injected reactive power is automatically adjusted according to the positive sequence voltage drop to assist the grid voltage recovery. According to the active power of PET before the voltage sag, the level and direction of the active power are maintained as far as possible without exceeding the current limit to reduce the disturbance to the AC/DC grids. In the case of asymmetric voltage drop, the negative sequence current suppression is regarded as the supplementary method to ensure the symmetry of the injected grid current. Finally, the effectiveness of the proposed LVRT strategy is verified by the case study.

Key words: power electronic transformer; low-voltage ride through; control strategy; current instruction value

随着分布式能源并网容量的增大和用户侧负荷“即插即用”需求的增长, 直流配电技术凭借其突出的供电能力、较强的可控性和良好的负荷兼容性, 已

逐步得到试点应用^[1-2], 传统交流配电网正向交直流混联配电网方向发展^[3-4]。电力电子变压器(power electronic transformer, PET)作为交直流混联配电

收稿日期: 2019-01-08; 修回日期: 2019-04-02

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(5210EF18001D); 国家重点研发计划(2016YFB0900600)

通信作者: 韩杰祥(1995-), 男, 博士研究生, 主要从事交直流混合配电网控制与保护技术的研究; E-mail: hanjiexiang@hust.edu.cn

网中的关键设备,承担着交直流系统互联、电压等级变换、潮流控制、电能质量调节、无功补偿等诸多任务^[5-7],其运行性能对电网的安全稳定运行具有重要影响。

在交直流混联配电网中,主供电源一般为交流电网电源。交流电网发生短路故障导致电压跌落时,PET 应实现不脱网低压穿越运行,以提高电网运行的稳定性和供电可靠性。目前,对 PET 的正常运行控制策略已经开展了大量研究^[8-11],但是对其低电压穿越运行控制策略研究相对较少。文献[12]针对交流侧不对称短路故障,提出采取负序电压注入法进行相间均压控制,但该措施会向电网注入负序电流,给电气设备运行带来不利影响。文献[13]提出采用零序电压注入法进行均压控制,同时通过负序电流抑制措施,降低负序电流影响。但是在低压穿越运行期间仍采用双环控制,系统调节速度缓慢,且影响负序电流抑制效果。文献[14]针对逆变型电源提出深度不对称故障条件下的低电压穿越运行控制策略,在电压跌落期间向电网注入无功功率,但是逆变型电源为功率单向传输装置,该策略并不能适应功率双向传输工况。

该文根据 PET 的结构特点,从维持系统稳定、协助系统电压恢复以及保证 PET 运行安全的角度出发,提出一种适应 PET 功率双向交换的低电压穿越运行控制策略,可实现电网短路故障时的无功电压支持和负序电流抑制,并有效降低有功功率波动。仿真结果验证所提出的低电压穿越运行控制策略的良好性能。

1 PET 拓扑结构

PET 根据其中间变换模块有无直流环节,可以划分为 AC/AC、AC/DC/AC 型 PET,后者因其良好可控性和高度灵活性而成为研究重点。AC/DC/AC 型 PET 包括级联 H 桥型和模块化多电平(MMC)型 2 种基本结构形式^[5]。其中,级联 H 桥型 PET 相对于 MMC 结构而言,具有功率密度高、三相星型连接时无桥臂环流等优势,在配电电压等级电力电子设备中研究和应用中得到广泛关注。该

文将结合工程实际,重点针对级联 H 桥型 PET 的低电压穿越控制策略开展研究。

级联 H 桥型 PET 的前级 AC-DC 模块由两个结构相同的星型级联单元实现交流和双极性直流之间的功率交换,是承担 PET 主要功能的关键组成部分,拓扑结构如图 1 所示。当电网发生不对称电压跌落时,PET 需要解决的主要问题之一是如何实现三相相间直流电压的均衡,以保证换流器的运行安全。文献[12-13]提出采用零序或负序电压注入等低电压穿越运行控制策略实现均压控制,但会导致控制复杂化,且控制策略的时滞效应会影响均压效果。针对上述问题,该文通过直流环节拓扑结构的优化设计,实现三相子模块直流自均压。图 1 中,级联链接桥臂的子模块在交流侧采用典型的级联 H 桥结构,在直流侧三相子模块统一并联形成直流端口。

级联单元子模块结构如图 2 所示,采用谐振型双向 DC-DC 变换器。当工作频率在谐振频率附近时,DC-DC 变比等于高频变压器变比,且工作性能稳定,带负载能力强^[15]。采用上述拓扑结构后,在交流侧发生三相电压不对称跌落时,可以实现并联模块自均流,进而实现交流侧串联模块自均压,无需增加相间均压控制环节,能够提高设备运行性能,并简化控制系统。

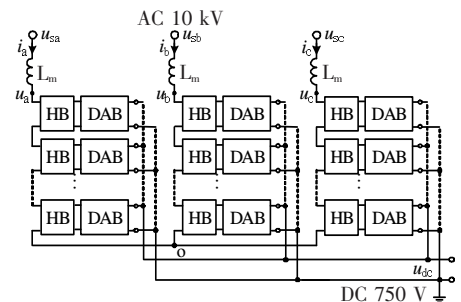


图 1 PET 前级 AC-DC 模块拓扑结构

Figure 1 The pre-stage AC-DC module of the PET

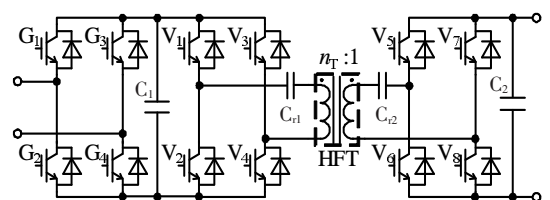


图 2 PET 子模块拓扑结构

Figure 2 The submodule topology of the PET

2 PET 低电压穿越运行控制策略

2.1 低电压穿越基本控制目标

PET 的 AC-DC 模块在正常运行时一般采用双闭环控制策略,如图 3 所示。根据 PET 的工作条件和控制目标,外环可以采用定直流电压控制或定功率控制,调节时间一般是 40~100 ms。电流内环采用 d 轴电压定向的前馈解耦控制策略,快速跟踪外环控制器调节产生的 d 、 q 轴电流指令值,改善控制性能,跟踪时间为 2~5 ms。

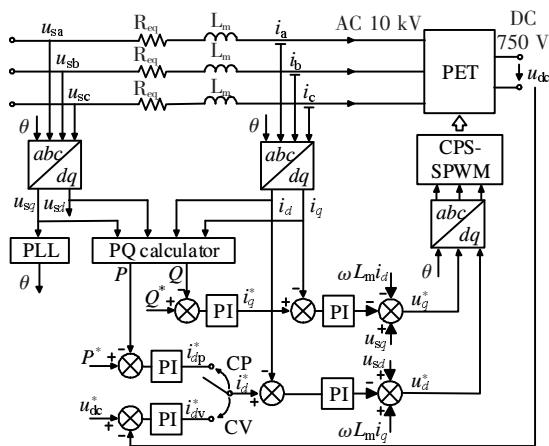


图 3 PET 的稳态控制原理

Figure 3 Steady state control schematic diagram of PET

当交流电网发生短路故障导致电压跌落时, PET 应实现不脱网低电压穿越运行,以提高电网运行的稳定性和供电可靠性。目前,虽针对 PET 低电压穿越控制策略开展了初步研究,但尚未形成统一认识。该文从维持电网运行稳定、协助电网电压恢复以及保证 PET 自身运行安全的角度,提出 PET 的低电压穿越(low-voltage ride through, LVRT)基本控制目标:

1) 当电网发生不对称短路故障时,通过负序电流抑制控制措施,消除负序电流,保证注入电网电流的对称性;

2) 根据交流侧正序电压跌落深度,自动调节无功电流注入,帮助电网电压恢复;

3) 根据电压跌落前的有功传输情况以及交流侧电压跌落深度,在保证 PET 电流不越限的前提下,最大程度维持有功传输水平和方向,减小对交直流电网的扰动。

低电压穿越运行控制策略如图 4 所示, α 为正序电压跌落深度,其值为电压跌落期间正序电压幅值和正常运行时电压幅值的比值,即

$$\alpha = u_{sd}^+ / u_{sd0} \quad (1)$$

当 PET 检测到 $\alpha < 0.9$ 时,自动切换至低电压穿越控制模式。考虑到直流电网中接有储能设备,在低电压穿越运行期间可以维持直流电压不变。通过闭锁控制器外环,直接采用电流内环进行控制,以提高整体响应速度。

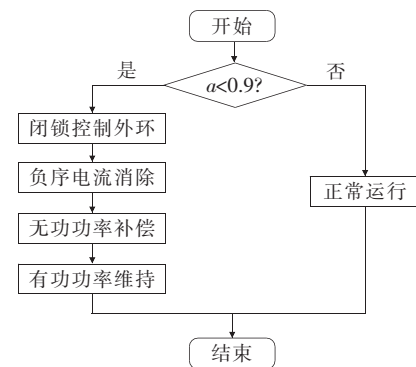


图 4 PET 低电压穿越运行控制策略

Figure 4 LVRT strategy of PET

2.2 低电压穿越运行控制策略实现方法

2.2.1 电流内环设计

PET 前级 AC-DC 变换器实现交流和双极性直流之间的电能变换,2 个星型级联结构的变换模块结构完全相同,故只针对交流侧和单极性直流之间的变换模块展开讨论。图 1 所示 PET 的 AC-DC 模块整体交流侧数学模型为

$$\begin{cases} L_m \frac{di_d}{dt} + R_{eq} i_d = u_{sd} - u_d + \omega L_m i_q \\ L_m \frac{di_q}{dt} + R_{eq} i_q = u_{sq} - u_q - \omega L_m i_d \end{cases} \quad (2)$$

式中 L_m 为桥臂滤波电感; R_{eq} 为级联 H 桥各子模块 IGBT 导通电阻和滤波电感附加电阻串联的等值电阻。

在电压不对称跌落期间,系统电压和电流中将包含正序和负序分量,在双 dq 坐标系^[16]中对式(2)进行正、负序分解,可以分别得到正、反向旋转坐标系中 PET 的 AC-DC 模块的交流侧数学模型:

$$\begin{cases} L_m \frac{di_{d+}^+}{dt} + R_{eq} i_{d+}^+ = u_{sd+}^+ - u_{d+}^+ + \omega L_m i_{q+}^+ \\ L_m \frac{di_{q+}^+}{dt} + R_{eq} i_{q+}^+ = u_{sq+}^+ - u_{q+}^+ - \omega L_m i_{d+}^+ \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} L_m \frac{di_{d-}^-}{dt} + R_{eq} i_{d-}^- = u_{sd-}^- - u_{d-}^- - \omega L_m i_{q-}^- \\ L_m \frac{di_{q-}^-}{dt} + R_{eq} i_{q-}^- = u_{sq-}^- - u_{q-}^- + \omega L_m i_{d-}^- \end{cases} \quad (4)$$

其中,各变量下角标中的“+”、“-”分别表示正、反向旋转坐标系,上角标中的“+”、“-”分别表示正、负序分量。

采用 PI 控制器进行电流调节并进行电流前馈解耦,根据式(3)、(4),可以分别得到正、负序 dq 轴电压指令值:

$$\begin{cases} u_{d+}^{+*} = - \left[k_p (i_{d+}^{+*} - i_{d+}^+) + k_i \cdot \int (i_{d+}^{+*} - i_{d+}^+) dt \right] + u_{sd+}^+ + \omega L_m i_{q+}^+ \\ u_{q+}^{+*} = - \left[k_p (i_{q+}^{+*} - i_{q+}^+) + k_i \cdot \int (i_{q+}^{+*} - i_{q+}^+) dt \right] + u_{sq+}^+ - \omega L_m i_{d+}^+ \\ u_{d-}^{-*} = - \left[k_p (i_{d-}^{-*} - i_{d-}^-) + k_i \cdot \int (i_{d-}^{-*} - i_{d-}^-) dt \right] + u_{sd-}^- - \omega L_m i_{q-}^- \\ u_{q-}^{-*} = - \left[k_p (i_{q-}^{-*} - i_{q-}^-) + k_i \cdot \int (i_{q-}^{-*} - i_{q-}^-) dt \right] + u_{sq-}^- + \omega L_m i_{d-}^- \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_{d-}^{-*} = - \left[k_p (i_{d-}^{-*} - i_{d-}^-) + k_i \cdot \int (i_{d-}^{-*} - i_{d-}^-) dt \right] + u_{sd-}^- - \omega L_m i_{q-}^- \\ u_{q-}^{-*} = - \left[k_p (i_{q-}^{-*} - i_{q-}^-) + k_i \cdot \int (i_{q-}^{-*} - i_{q-}^-) dt \right] + u_{sq-}^- + \omega L_m i_{d-}^- \end{cases} \quad (6)$$

式中 k_p 、 k_i 分别为 PI 控制器的比例、积分系数。电流内环解耦后的统一控制框图模型如图 5 所示, x^* 和 x 分别代表式(5)、(6)中各电流指令值和实际值。按照典型 I 型系统对电流内环控制器参数进行整定,电流内环可以等值为一阶惯性环节,其时间常数为 $2 \sim 5 \text{ ms}^{[17]}$ 。

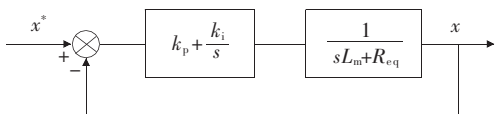


图 5 电流内环统一控制框图模型

Figure 5 Current inner loop unified control block diagram

2.2.2 负序电流消除

在电网电压不对称跌落期间,为了保证注入电网三相电流的对称性,减小对电网的影响,进行负序电流消除,即

$$\begin{cases} i_{d-}^{-*} = 0 \\ i_{q-}^{-*} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将式(6)中的负序电流 dq 轴分量指令值设定为零,负序电流 dq 轴分量将迅速跟踪式(7)所示指令值,实现负序电流消除的功能。

2.2.3 无功功率输出

q 轴正序电流指令值为

$$\begin{cases} 0, & \alpha > 0.9 \\ i_{q+}^{+*} = \begin{cases} 1.5(0.9 - \alpha), & 0.1 < \alpha < 0.9 \\ 1.2, & \alpha < 0.1 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

在电压跌落小于 10% 的情况下, PET 能够按照正常控制策略稳定运行,此时 $i_{q+}^{+*} = 0$, 实现单位功率因数运行。当电压跌落超过 10% 时,每跌落 10%, PET 向交流电网提供 15% 的无功补偿,支撑电网 PCC 电压,帮助电网电压恢复。出于电压严重跌落期间 PET 对电网补偿能力及其自身过流能力和安全性的考虑,将 PET 的最大补偿能力设定为 1.2 倍额定电流。

2.2.4 有功水平维持

在电网电压跌落期间, PET 从电网吸收的有功功率为

$$P =$$

$$u_{sd+}^+ i_{d+}^+ + u_{sq+}^+ i_{q+}^+ + u_{sd-}^- i_{d-}^- + u_{sq-}^- i_{q-}^- \quad (9)$$

当采用电网正序 d 轴电压定向时, $u_{sq+}^+ = 0$ 。低电压穿越运行期间,负序电流能够快速跟踪式(7)的指令值,即 $i_{d-}^- = i_{q-}^- = 0$ 。正序 d 轴电流也能够快速跟踪其指令值。由以上分析可得电压跌落期间 PET 吸收功率:

$$P = u_{sd+}^+ i_{d+}^{+*} \quad (10)$$

电网电压跌落前 PET 从电网吸收的功率为

$$P_0 = u_{sd0} i_{d0}^* \quad (11)$$

结合式(1)、(10)、(11)可知,电压跌落期间,忽略 PET 传输损耗,要使有功传输水平不发生变化,须使正序 d 轴电流指令值满足:

$$i_{d+}^{+*} = i_{d0}^* / \alpha \quad (12)$$

因此,可以得到 d 轴正序电流指令值:

$$i_{d+}^{+*} =$$

$$\text{sign}(i_{d0}^*) \cdot \min\{ |i_{d0}^*| / \alpha, \sqrt{1.2^2 - i_{q+}^{+*2}} \} \quad (13)$$

式中 sign 为符号函数,提取电压跌落前有功功率的传输方向,使得低电压穿越运行控制策略能够适应 PET 双向功率传输的特点; $\sqrt{1.2^2 - i_{q+}^{+*2}}$ 为按照式(8)进行无功补偿后的最大允许有功电流指令值。

将式(8)代入式(13),找出电压跌落后的正序有功电流指令值上限以及维持电压跌落前有功水平的正序有功电流指令需求值同电压跌落深度之间的关系,如图6所示,实线为无功补偿后的最大允许有功电流,即有功电流上限,随着电压跌落深度加深,无功需求逐渐增大,有功传输上限逐渐减小;虚线簇由下到上分别为电压跌落前 PET 由空载到满载运行,间隔 0.1 p. u. 的不同初始状态在不同电压跌落深度下,为维持电压跌落前的有功水平所需要的有功输出量。由图6可见,根据式(13)可以实现最大程度维持电压跌落前有功水平的要求。以电压跌落前有功指令值为 0.6 为例,图6中水平虚线为电压跌落前有功电流,在电压跌落不低于 55%的条件下,可以保证电压跌落前后有功传输水平和方向维持恒定。

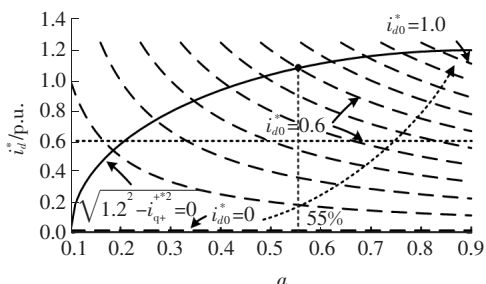


图6 有功电流补偿能力示意

Figure 6 Schematic diagram of active current compensation capability

3 仿真验证

为了验证该文所提出的 PET 低电压穿越运行控制策略的有效性,在 PSCAD/EMTDC 中搭建四端口 PET 的仿真模型进行仿真验证,仿真模型如图7所示。PET 通过工频变压器和交流电网连接,直流侧并入接有分布式电源与直流负荷的±750 V 直流母线,低压交流和直流端口分别向交流和直流负荷供电。当 f 点发生短路时,通过调节过渡电阻使得 10 kV 母线处发生电压对称和不对称跌落,对该文提出的 PET 低电压穿越运行控制策略进行验证。仿真系统参数如表 1 所示。

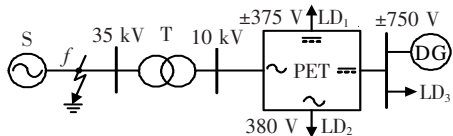


图7 PET 仿真系统模型

Figure 7 PET simulation system model

表 1 仿真系统参数

Table 1 Simulation system parameters

仿真参数	单位	数值	仿真参数	单位	数值
PET 额定容量	MV · A	3	桥臂等值电阻	Ω	0.01
PET 额定 AC 电压	kV	10	并网变压器变比	—	35/10.5
PET 额定 DC 电压	kV	±0.75	并网变压器容量	MV · A	30
桥臂滤波电感	H	0.02	并网变压器漏抗	p. u.	0.1

3.1 三相电压对称跌落

设置 PET 连接母线处发生三相电压对称跌落,跌落时刻为 $t=0.3$ s,跌落程度 $\alpha=0.4$ 。电压跌落前设置 PET 分别以 $P^*=0.375$ 、 $P^*=-0.375$ 单位功率因数运行。电压对称跌落情况下的仿真波形如图 8~13 所示。

图 8、9 为 PET 工作于整流和逆变状态 2 种工况下电压跌落时的 A 相电压、电流波形。图 10、11 为 dq 轴电流指令值及实际值波形。考虑到锁相环存在 5 ms 的调节延时,在检测到锁相环输出正序电

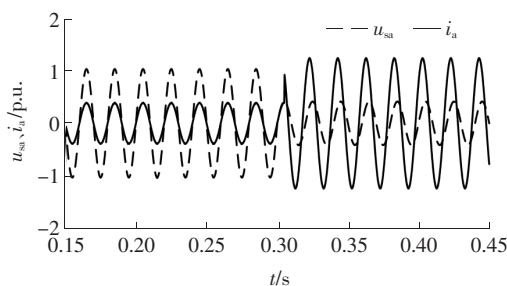


图8 整流状态下电压跌落时 A 相电压电流

Figure 8 Phase A voltage and current when the voltage drops in the rectified state

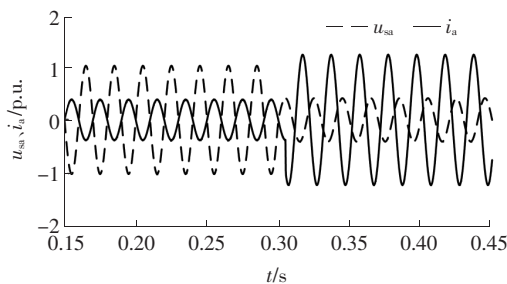


图9 逆变状态下电压跌落时 A 相电压电流

Figure 9 Phase A voltage and current when the voltage drops in the inverter state

压跌落 5 ms 内闭锁控制器外环,但是仍以电压跌落前 dq 电流指令值作为内环给定值,该处理方式可以防止锁相环调节过程中带来的功率波动,也可以防止系统电压闪变引起的锁相环输出结果抖动对控制系统和 PET 正常运行的影响。图 12、13 为 PET 吸收功率波形。电压跌落, PET 能够根据电压跌落深度向交流系统注入无功,帮助交流系统电压恢复。并且能够维持故障前有功传输水平。

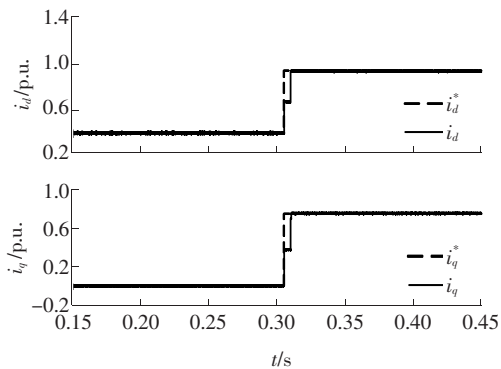


图 10 整流状态下电压跌落时 dq 轴电流

Figure 10 dq -axis current when the voltage drops in the rectified state

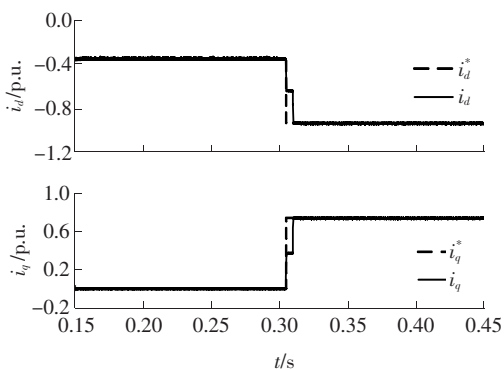


图 11 逆变状态下电压跌落时 dq 轴电流

Figure 11 dq -axis current when the voltage drops in the inverter state

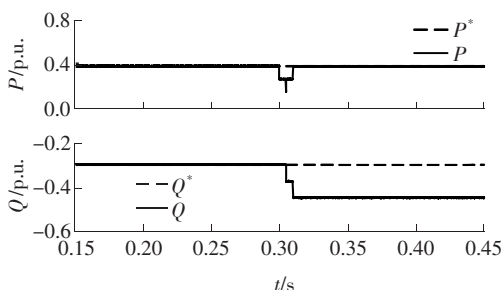


图 12 整流状态下电压跌落时功率波形

Figure 12 Power waveform when the voltage drops in the rectified state

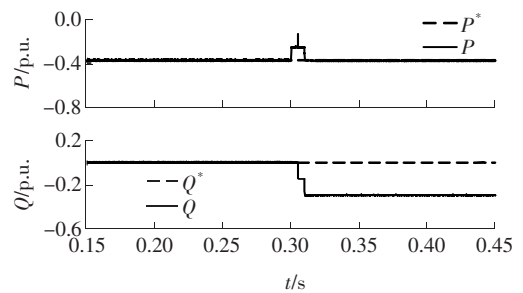


图 13 逆变状态下电压跌落时功率波形

Figure 13 Power waveform when the voltage drops in the inverter state

3.2 三相电压不对称跌落

设置 PET 连接母线处 A 相电压不变, B、C 两相电压幅值跌落到原来的 40%。根据对称分量法进行计算可以得到正序电压跌落深度 $\alpha = 0.6$, 在该工况下分别就电压跌落前空载运行和电压跌落前满载运行的情况进行仿真验证。

3.2.1 电压跌落前 PET 空载

电压不对称跌落前正向旋转坐标系中正序电流 dq 轴分量波形如图 14 所示, 电流内环能够在 5 ms 内快速准确地跟踪内环电流指令值, 且能够调节 q 轴电流向电网注入无功功率。相应的三相电流波形如图 15 所示, 因为采取负序电流消除的措施, 所以在三相电压不对称跌落的情况下, 仍能保证三相电流对称注入电网, 减小对电网影响。

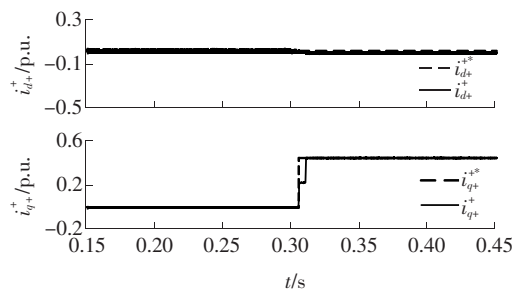


图 14 空载状态下电压跌落时正序 dq 轴电流

Figure 14 Positive sequence dq -axis current when the voltage drops under no-load condition

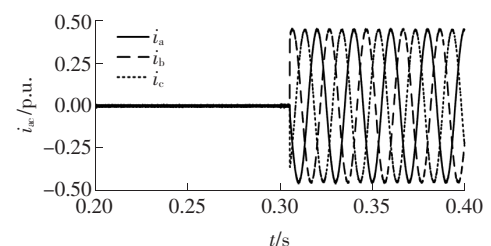


图 15 空载状态下电压跌落时三相并网电流

Figure 15 Three-phase grid-connected current when the voltage drops under no-load condition

3.2.2 电压跌落前 PET 满载

电压不对称跌落前 PET 满载按照功率双向交换进行仿真。PET 吸收有功情况下的正、反向坐标系中的正、负序电流 dq 轴分量波形如图 16、17 所示。可见,正序电流能够在 5 ms 内迅速跟随指令值变化,负序电流内环能够在电压跌落前迅速消除负序电流。

PET 向交流系统注入有功功率情况下的三相电流和功率波形如图 18、19 所示。可见,采用负序电流消除控制策略可以保证电压不对称跌落情况下注入电网电流的对称性。PET 能够向电网进行无功补偿,协助电网电压恢复,最大程度维持电压跌落前的有功水平,减小对电网的扰动。

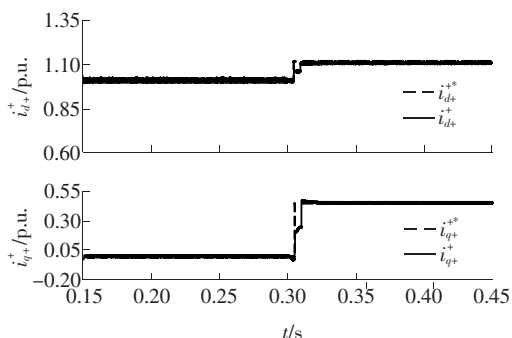


图 16 满载状态下电压跌落时正序 dq 轴电流

Figure 16 Positive sequence dq -axis current when the voltage drops under full load condition

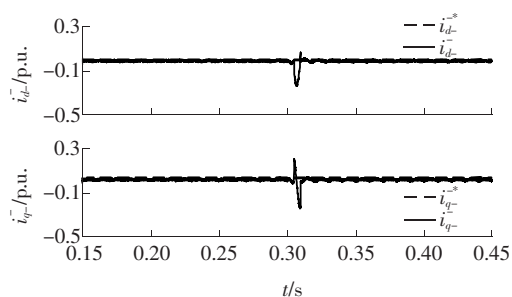


图 17 满载状态下电压跌落时负序 dq 轴电流

Figure 17 Negative sequence dq -axis current when the voltage drops under full load condition

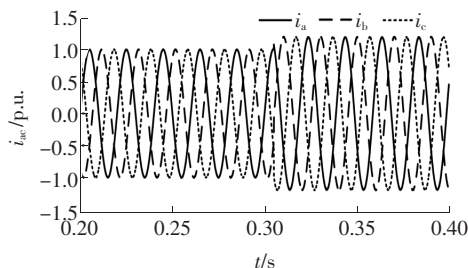


图 18 满载状态下电压跌落时三相并网电流

Figure 18 Three-phase grid-connected current when the voltage drops under full load condition

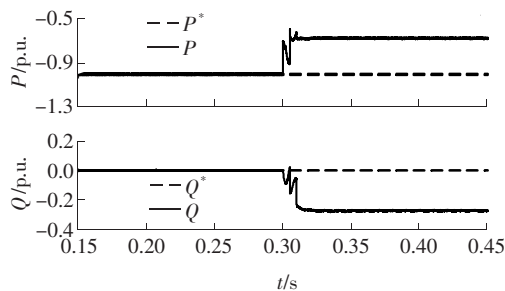


图 19 满载状态下电压跌落时功率波形

Figure 19 Power waveform when the voltage drops under full load condition

4 结语

该文提出了一种适用于电力电子变压器功率双向传输的低电压穿越运行控制策略,并通过仿真模型验证了电压对称跌落和不对称跌落条件下该低电压穿越运行控制策略的有效性。该策略具有以下功能特点:

1) 在 PET 交流侧电压跌落期间,闭锁功率或电压外环,直接进行电流内环指令值给定,提高了系统整体响应速度;

2) 在电压不对称跌落期间,抑制负序电流,保证注入电网电流的对称性;

3) 根据正序电压跌落深度,进行相应的无功电流注入,帮助电压跌落期间电网电压恢复;

4) 根据电压跌落前的有功传输情况,在载流上限范围内最大程度地保证有功传输的水平和方向,减少对交直流电网的扰动。

参考文献:

- [1] 王珍意,黄文杰,赵川,等. 含分布式电源的中压柔性直流配电网研究[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(1): 102-108.
WANG Zhenyi, HUANG Wenjie, ZHAO Chuan, et al. Research on flexible medium voltage DC distribution network with distributed generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 102-108.
- [2] 苏麟,朱鹏飞,闫安心,等. 苏州中压直流配电工程设计方案及仿真验证[J]. 中国电力,2021,54(1): 78-88.
SU Lin, ZHU Pengfei, YAN Anxin, et al. Design scheme and simulation verification of Suzhou medium voltage DC distribution project[J]. Electric Power, 2021, 54(1): 78-88.
- [3] 张福民,刘国鑫,李占凯,等. 基于二阶锥规划的交直流混

- 合配电网优化调度[J]. 智慧电力,2020,48(3): 117-123.
- ZHANG Fumin, LIU Guoxin, LI Zhankai, et al. Optimal dispatch of AC/DC hybrid distribution network based on second-order cone programming[J]. Smart Power,2020,48(3): 117-123.
- [4] 陈丽安,赵航,肖业湘,等. 交直流混和有源配电系统保护方案研究[J]. 电力科学与技术学报,2015,30(3): 31-39.
- CHEN Li'an, ZHAO Hang, XIAO Yexiang. Protection scheme for hybrid AC/DC power distribution system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015,30(3): 31-39.
- [5] 李子欣,高范强,赵聪,等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(5): 1274-1289.
- LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(5): 1274-1289.
- [6] 王鹤,栾钧翔. 变压器的电力电子化演进及其对电压稳定影响综述[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(16): 171-187.
- WANG He, LUAN Junxiang. Summary of power electronic evolution of transformer and its influence on voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(16): 171-187.
- [7] 杨汾艳,李海波,盛超,等. 多端口级联式电力电子变压器可靠性评估模型及其应用[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(20):41-49.
- YANG Fenyan, LI Haibo, SHENG Chao, et al. Reliability evaluation model of cascaded multiport power electronic transformer and its application[J]. Power System Protection and Control,2019,47(20):41-49.
- [8] 舒恺,刘峰,郭高鹏,等. 并网型直流微电网协调控制策略[J]. 电网与清洁能源,2020,36(11): 58-67.
- SHU Kai, LIU Feng, GUO Gaopeng, et al. The coordinated control strategy for grid-connected DC microgrid[J]. Power System and Clean Energy,2020,36(11): 58-67.
- [9] Zhao T, Wang G, Bhattacharya S, et al. Voltage and power balance control for a cascaded H-bridge converter-based solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(4): 1523-1532.
- [10] 孙玉巍,李永刚,刘教民,等. 级联式电力电子变压器协调控制策略[J]. 中国电机工程学报,2018,38(5): 1290-1300.
- SUN Yuwei, LI Yonggang, LIU Jiaomin, et al. Coordinative control strategy for cascaded power electronic transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1290-1300.
- [11] 周保柱,赵峰,高峰阳,等. 基于复合控制的电力电子变压器控制策略研究[J]. 电测与仪表,2019,56(9): 21-26.
- ZHOU Baozhu, ZHAO Feng, GAO Fengyang. Research on control strategy of power electronic transformers based on composite control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2019,56(9):21-26.
- [12] Tian J, Mao C X, Wang D, et al. Analysis and control of electronic power transformer with star-configuration under unbalanced conditions[J]. IET Electric Power Applications,2015,9(5): 358-369.
- [13] 冯宇鹏,吴金龙,王先为,等. 电网不平衡故障下电力电子变压器控制策略[J]. 电力建设,2016,37(7): 84-90.
- FENG Yupeng, WU Jinlong, WANG Xianwei, et al. Control strategy of power electronic transformer under unbalanced grid fault[J]. Electric Power Construction,2016,37(7): 84-90.
- [14] 刘素梅,毕天姝,薛安成. 深度不对称故障下逆变电源控制策略研究[J]. 电力科学与技术学报,2012,27(3): 34-40.
- LIU Sumei, BI Tianshu, XUE Ancheng. Study on the control of inverter-interfaced renewable generators under severe asymmetrical faults[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2012,27(3): 34-40.
- [15] Huang J, Xiao J, Wen C, et al. Implementation of bidirectional resonant DC transformer in hybrid AC/DC micro-grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019,10(2): 1532-1542.
- [16] 张树楠,罗海云,程晓绚,等. 基于双 dq 变换正负序提取及锁相环的FPGA实现[J]. 高压电器,2020,56(3): 182-189.
- ZHANG Shunan, LUO Haiyun, CHENG Xiaoxuan, et al. Realization of positive & negative sequence component picking up and phase locked loop using FPGA based on dual- dq transform[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(3): 182-189.
- [17] 孔祥平,张哲,尹项根,等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(34): 65-74.
- KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(34): 65-74.