

电力电子变压器自治运行控制策略

张怀天¹, 荆 龙¹, 吴学智², 王 帅¹

(1. 北京交通大学国家能源主动配电网技术研发中心, 北京市 100044; 2. 北京电动车辆协同创新中心, 北京市 100044)

摘要: 针对应用于交直流配电网的电力电子变压器, 根据孤岛模式下配电网的运行特性, 提出了一种应用于孤岛模式的自治运行控制策略, 通过建立全局化的多端口传输模型, 统一各端口的运行状态, 协调各端口的能量交换, 充分发挥电力电子变压器各个端口能量互通、相互支撑的优势, 实现配电网的自治运行。搭建了含电力电子变压器的交直流配电网仿真系统, 验证了控制策略的有效性。

关键词: 交直流配电网; 电力电子变压器; 自治运行; 多端口传输模型

0 引言

伴随着分布式发电、储能、电力电子等技术的不断发展, 配电网中用户侧分布式可再生发电容量占比不断提高, 分布式储能、直流负荷等供电需求日益显现, 配电网中潮流在电网与用户、高压配电网与中压配电网、中压配电网与低压配电网之间双向互动的需求日益增多。与交流配电相比, 直流配电因具有无稳定性问题、输电效率高、调节快速可靠、节省输电走廊等优势, 成为未来配电网的发展趋势^[1-2]。

电力电子变压器(PET)是一种将电力电子器件和高频变压器相结合的装置, 相对传统变压器, PET具有体积小和重量小、无需变压器油等优点^[3]。由于具有高低压交流端口和直流端口, 工作过程中同时兼有直流与交流环节, 各种小容量分布式电源(DG)可经 PET 接入电网。PET 在完成常规变压器对电压等级变换、电气隔离和能量传递等功能的同时, 还能实现潮流控制和电能质量调节等功能, 有效隔离电压波动以及谐波传递, 实现电网侧和负载侧的解耦^[4]。通过 PET 控制策略的合理设计, 可实现不同电力特征电能之间的相互转换, 实现高低压、中低压配电网能量的协调管理。

目前, 针对 PET 的控制策略研究只是把 PET 当做被动执行元件, 无法发挥 PET 智能、支持 DG 和负荷更灵活接入的特点^[5-7]。文献[8-10]仅分析了 PET 的基本控制策略和调制方式, 未涉及与配电网的协调运行。而 PET 在实际交直流配电网中, 需要复杂的调度控制算法, 过分依赖于上层控制器和

通信网络, 无法完全发挥 PET 各个端口能量互通、相互支撑的优势。文献[11]针对交直流配电网的能量传输提出了一种混合功率下垂控制策略, 根据端口特征信号计算不同端口间需传输的功率, 但该控制器设计复杂, 计算量大, 且无法实现端口间能量的任意分配。文献[12-13]提出了两种近似的电力电子变换器的双向下垂控制方法, 但均只考虑单一电压等级, 且各端口必须按照统一的负荷率输出功率。

本文采用基于模块化多电平换流器(MMC)结构的 PET 拓扑, 根据孤岛模式下配电网的运行特性, 提出了一种应用于孤岛模式的自治运行控制策略, 通过建立全局化的多端口传输模型, 根据端口特征信号, 实现多端口的标幺化, 统一各端口的运行状态, 协调各端口的能量交换。通过平移端口特征曲线, 改变各端口的负荷率, 不依靠上层控制, 充分发挥 PET 各个端口能量互通、相互支撑的优势, 实现配电网的自治运行。最后, 通过含 PET 的交直流配电网仿真系统, 验证了控制策略的有效性。

1 PET 结构

本文采用基于 MMC 的 PET 拓扑, 如图 1 所示。高压输入级采用 MMC 结构, 每个桥臂由 n 个子模块(SM)和一个串联电抗器 L 组成, 子模块采用级联方式。高压输入级可以参考 MMC 的基本控制方式。文献[14]根据 MMC 子模块能量均分和电压均衡原则, 提出了一种子模块电容电压平衡控制策略, 能有效平衡各子模块电容电压, 保证直流电压的稳定。文献[15]提出了一种基于 MMC 环流模型的通用环流抑制策略, 无需负序坐标变换和相间解耦, 可对任意相数的 MMC 实现环流抑制。

收稿日期: 2017-07-13; 修回日期: 2017-09-20。

上网日期: 2017-11-21。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900505)。

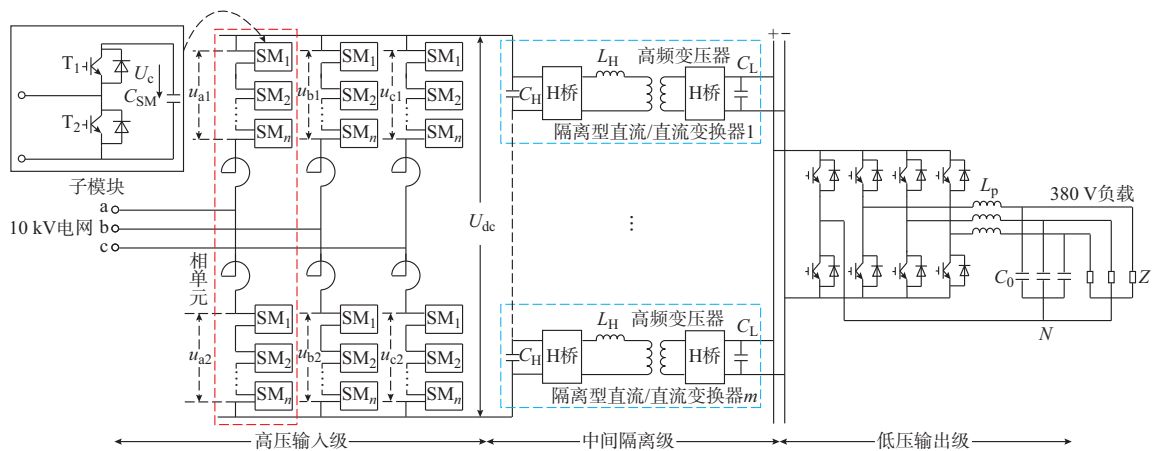


图 1 基于 MMC 的 PET 拓扑
Fig.1 PET topology based on MMC

中间隔离级将输入较高的直流电压转变为高频交流电压,经过高频变压器降压,在副边再还原为较低的直流电压输出。由于输入侧电压等级较高,故直流/直流变换器模块采用输入串联、输出并联的组合方式。文献[16]分析了直流/直流变换器模块输入均压/均流与输出均压/均流的内在关系,研究了直流/直流变换器模块串并联组合系统的控制策略。

低压输出级采用三相四桥臂逆变器,将隔离级输出的低压直流电压,转换为供给用户的 400 V 等级工频交流电压。与传统三相逆变器相比,三相四桥臂逆变器带不平衡负载的能力较强,可在负载不平衡或非线性情况下维持三相电压的高质量输出。文献[17]建立了三相四桥臂逆变器的数学模型,研究了三相四桥臂逆变器同步旋转坐标系下的比例-积分(PID)控制策略。

2 交直流配电网特性分析

2.1 含 PET 的交直流配电网结构

PET 通过中、低压交直流端口连接中、低压交直流配电网,如附录 A 图 A1 所示。各配电网均包含光伏和风电机组等 DG,以及蓄电池、超级电容和燃料电池等储能单元。在并网模式下,10 kV 主网接入中压交流端口,支撑交流配电网母线电压、频率和直流配电网母线电压。在孤岛模式下,交直流配电网均与主网断开连接,储能单元为交直流母线提供电压和频率支撑。由于缺少了主网对功率的支撑,系统内负荷所需功率均由 DG 提供,功率协调尤为重要,故配电网间快速准确的功率传输是 PET 控制的核心。

2.2 孤岛模式下配电网特性分析

在孤岛模式下,交流配电网中 PET 和 DG 的有功、无功功率输出分别基于 f - P 、 V - Q 下垂特性,

如附录 A 图 A2 所示。由于 f - P 、 V - Q 下垂特性基于高压输电线路阻抗以感性为主的假设,但中、低压配电网中,线路阻抗阻性成分大大增加,会使得中、低压配电网特性发生变化,严重时变为 V - P 、 f - Q 特性。但可以通过逆变器输出串联电感,调整电流环 PI 参数,引入虚拟阻抗控制等方法^[18-20],使中、低压配电网中逆变器仍然适用 f - P 、 V - Q 下垂特性。

各 DG 单元 f - P 、 V - Q 下垂特性的数学描述为:

$$f_x = f_x^0 + m_x P_{a,x} \tag{1}$$

$$V_{a,x} = V_{a,x}^0 + n_x Q_{a,x} \tag{2}$$

式中: f_x 和 $V_{a,x}$ 分别为频率和电压幅值; f_x^0 和 $V_{a,x}^0$ 分别为空载时的频率和电压幅值; m_x 和 n_x 为负下垂系数; $P_{a,x}$ 和 $Q_{a,x}$ 分别为有功和无功功率; x 表示交流配电网中各 DG 单元。

稳态时,配电网中各 DG 单元频率相同,如附录 A 图 A2 中虚线所示。为使各 DG 能按照其容量 $S_{a,x}$ 分担负荷功率需求,需令:

$$m_1 S_{a,1} = m_2 S_{a,2} = \dots = m_x S_{a,x} \tag{3}$$

与交流配电网相比,直流配电网中 DG 仅需考虑有功功率和直流电压的关系,无需考虑无功功率和频率, V - P 下垂特性如附录 A 图 A3 所示。 V - P 下垂特性的数学描述为:

$$V_{d,y} = V_{d,y}^0 + v_y P_{d,y} \tag{4}$$

式中: $V_{d,y}$ 为直流电压; $V_{d,y}^0$ 为空载时的直流电压; v_y 为负下垂系数; $P_{d,y}$ 为有功功率; y 表示直流配电网中各 DG 单元。

为简化分析,稳态时,忽略线路阻抗等因素的影响,认为各 DG 单元输出电压相同。为使各 DG 能按照其容量 $S_{d,y}$ 分担负荷功率需求,需令:

$$v_1 S_{d,1} = v_2 S_{d,2} = \dots = v_y S_{d,y} \tag{5}$$

根据电能质量的国家标准,10 kV 及以下三相供电电压允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$;正常频率偏

差允许值为 ± 0.2 Hz。本文取电压允许偏差为额定电压的 $\pm 5\%$,正常频率偏差允许值为额定频率的 $\pm 3\%$ 。

3 孤岛自治运行控制策略

3.1 全局化的多端口传输模型

为实现 PET 各端口能量流动的一致性,建立 PET 全局化的多端口传输模型,如图 2 所示。图中, P_1, P_2, P_3, P_4 分别为端口 1, 2, 3, 4 的输出功率。端口 1, 2, 3, 4 分别为中压交流、中压直流、低压交流和低压直流端口,分别连接中压交流、中压直流、低压交流和低压直流配电网。

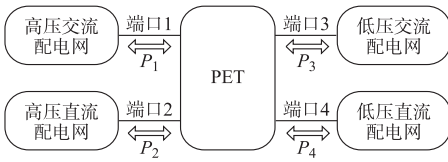


图 2 全局化多端口传输模型

Fig.2 Globalized multi-port transmission model

由于电压等级和特征信号的差异,各端口运行状态很难统一。由于配电网在孤岛模式下具有 2.2 节所述的运行特性,故可对各端口特征信号(交流端口频率和直流端口电压)进行标幺化,用以表征交直

流配电网的负荷率,进而协调端口间能量的流动,统一各端口的运行状态。

通过式(6)至式(9)分别对端口 1, 2, 3, 4 的特征信号进行标幺化处理:

$$f_{1,pu} = \frac{f_1 - 0.5(f_{1,max} + f_{1,min})}{0.5(f_{1,max} - f_{1,min})} + k_1 \quad (6)$$

$$V_{1,pu} = \frac{V_1 - 0.5(V_{1,max} + V_{1,min})}{0.5(V_{1,max} - V_{1,min})} + k_2 \quad (7)$$

$$f_{2,pu} = \frac{f_2 - 0.5(f_{2,max} + f_{2,min})}{0.5(f_{2,max} - f_{2,min})} + k_3 \quad (8)$$

$$V_{2,pu} = \frac{V_2 - 0.5(V_{2,max} + V_{2,min})}{0.5(V_{2,max} - V_{2,min})} + k_4 \quad (9)$$

式中: f_1 和 f_2 分别为中、低压交流端口频率; V_1 和 V_2 分别为中、低压直流端口电压;下标 pu 表示相应量的标幺值;下标 max 和 min 分别表示相应量的最大和最小值; k_n ($n=1, 2, 3, 4$) 为端口 n 下垂曲线平移量,在下文中用以调节各配电网的负荷率。

经标幺化后,各端口的下垂特性曲线可以放在同一坐标系中,如图 3 所示。图中, $P_{1,max}, P_{2,max}, P_{3,max}, P_{4,max}$ 分别为中压交流、中压直流、低压交流、低压直流配电网的最大容量。通过 PI 调节器使 $f_{1,pu} = V_{1,pu} = f_{2,pu} = V_{2,pu}$,即可保证各配电网稳定运行。

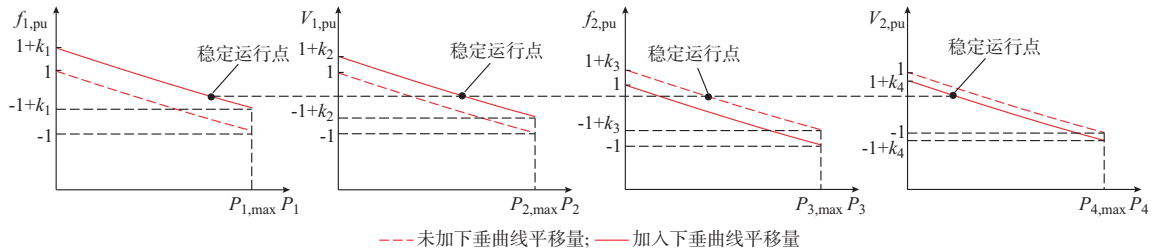


图 3 多端口下垂特性曲线

Fig.3 Droop characteristic curves of multi-port

设系统的总负荷量为 P_{tot} , 中压交流、中压直流、低压交流、低压直流配电网的负荷率分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 。由图 2 和图 3 可得,稳态时,各配电网输出功率之和等于系统总负荷量,且各配电网工作于

同一稳定运行点,由此可得:

$$\begin{cases} \lambda_1 P_{1,max} + \lambda_2 P_{2,max} + \lambda_3 P_{3,max} + \lambda_4 P_{4,max} = P_{tot} \\ k_1 - 2\lambda_1 = k_2 - 2\lambda_2 = k_3 - 2\lambda_3 = k_4 - 2\lambda_4 \end{cases} \quad (10)$$

对式(10)进行求解,可得:

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} - \frac{P_{1,max}}{2P} & -\frac{P_{2,max}}{2P} & -\frac{P_{3,max}}{2P} & -\frac{P_{4,max}}{2P} \\ -\frac{P_{1,max}}{2P} & \frac{1}{2} - \frac{P_{2,max}}{2P} & -\frac{P_{3,max}}{2P} & -\frac{P_{4,max}}{2P} \\ -\frac{P_{1,max}}{2P} & -\frac{P_{2,max}}{2P} & \frac{1}{2} - \frac{P_{3,max}}{2P} & -\frac{P_{4,max}}{2P} \\ -\frac{P_{1,max}}{2P} & -\frac{P_{2,max}}{2P} & -\frac{P_{3,max}}{2P} & \frac{1}{2} - \frac{P_{4,max}}{2P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{P_{tot}}{P} \\ \frac{P_{tot}}{P} \\ \frac{P_{tot}}{P} \\ \frac{P_{tot}}{P} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $P = P_{1,max} + P_{2,max} + P_{3,max} + P_{4,max}$ 。

可以看出,通过改变 k_n ($n=1, 2, 3, 4$) 的值,上

下平移端口特征曲线,改变各端口的负荷率,实现端口间能量的任意分配。当 $k_1 = k_2 = k_3 = k_4$ 时,各配

电网负荷率相等。采用此种控制方法,能量可以双向流动,PET 能够四象限运行,光伏可以接入直流侧,不需要逆变器。

3.2 自治运行控制策略

下垂控制方法现已广泛应用于 DG 的控制当中,采用下垂控制的 DG,可以依据公共连接点的信息及输出功率,自动调整工作点,使得多台逆变器之间实现协调运行。本文中使用时下垂控制的 PET 与传统使用时下垂控制的逆变器有所不同,传统逆变器只有一个输出端口,通过下垂控制使多个逆变器可以协调运行,而 PET 是多端口装置,每个端口连接不同的配电网,运行时需要协调各个端口的功率输出,保证整个装置的传输功率平衡。目前对于 PET 能量输送及平衡的研究,基本都是利用上级电网或控制器的调度指令,PET 被动地实现能量传输,本文则利用下垂控制实现 PET 各个端口的功率平衡,以及不同端口连接的不同配电网电能质量的最优控制,有利于柔性变电站的无人值守及智能自治运行。

在 PET 全局化多端口传输模型的基础上,通过 PET 各级控制实现端口间能量的分配。直流端口作为连接不同电压等级交直流配电网的“桥梁”,承担着不同电压等级配电网间能量分配的任务。通过中间隔离级实现直流端口间的功率交换,控制策略如图 4 所示。将中、低压直流端口电压分别经式(7)、式(9)进行标幺化,作差得到差异信号 $e_{d,pu}$,经 PI 调节器得到直流端口间需交换功率 P_d 的参考值 P_d^{ref} ,从而得到直流电流参考值 i_d^{ref} 。

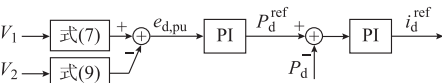


图 4 直流端口功率控制
Fig.4 Power control of direct current port

由于交流配电网涉及无功功率,故当 PET 向交流配电网传输功率时,需考虑交流配电网的 V-Q 下垂特性,传输无功功率参考值如式(12)所示。

$$Q_a^{ref} = \begin{cases} n^{-1} (V_a - V_a^*) & P_a^{ref} \geq 0 \\ 0 & P_a^{ref} < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: n 为负下垂系数; V_a 和 V_a^* 分别为交流母线电压及其基准值; P_a^{ref} 为 PET 向交流配电网传输功率的参考值。

通过高压输入级 MMC 和低压输出级三相四桥臂逆变器实现交直流端口间的功率交换。以高压输入级 MMC 为例,控制策略如图 5 所示。将采集到的中压交流母线电压经锁相环(PLL)得到交流端口频率,经式(6)进行标幺化,与经式(7)得到的直流端

口电压标幺值作差,得到差异信号 $e_{1,pu}$,经 PI 调节器得到中压交、直流端口间需交换有功功率 P_{a1} 的参考值 P_{a1}^{ref} ,将交流母线电压幅值 V_{a1} 与 P_{a1}^{ref} 经式(12)得到需交换无功功率 Q_{a1} 的参考值 Q_{a1}^{ref} ,从而得到中压交、直流端口有功和无功电流参考值 i_{d1}^{ref} 和 i_{q1}^{ref} 。同理可得低压输出级三相四桥臂逆变器的控制策略如图 6 所示。

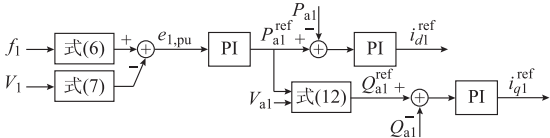


图 5 中压交、直流端口功率控制
Fig.5 Power control of medium-voltage alternating current and direct current ports

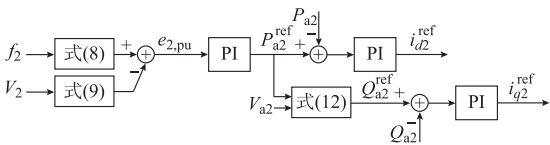


图 6 低压交、直流端口功率控制
Fig.6 Power control of low-voltage alternating current and direct current ports

4 仿真验证

为验证 PET 自治运行控制策略的有效性,本文搭建了基于 PET 的 MATLAB/Simulink 仿真系统,部分仿真参数如附录 A 表 A1 所示。

1) 仿真条件 1,各配电网最大容量见附录 A 表 A2,下垂曲线平移量均为 0。0.2~0.6 s(时段 1),各配电网负荷量均为 0.1 MW;0.6~1.2 s(时段 2),中压交流配电网负荷量增大到 0.4 MW;1.2~1.8 s(时段 3),中压直流配电网负荷量增大到 0.3 MW。仿真结果如附录 A 图 A4 所示。

各配电网功率变化如表 1 所示。

表 1 各配电网功率变化
Table 1 Power of each distribution network

配电网	负荷量/MW			输出功率/MW		
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 1	时段 2	时段 3
中压交流	0.1	0.4	0.4	0.125	0.219	0.281
中压直流	0.1	0.1	0.3	0.125	0.219	0.281
低压交流	0.1	0.1	0.1	0.075	0.131	0.169
低压直流	0.1	0.1	0.1	0.075	0.131	0.169

可见,在时段 1 时,各配电网负荷量均为 0.1 MW,各配电网负荷率均为 25%;在时段 2 时,中压交流配电网负荷量增大到 0.4 MW,各配电网负荷率均增大到 43.8%;在时段 3 时,中压直流配电网负荷量增大到 0.3 MW,各配电网负荷率均增大到

56.2%。由仿真结果可以看出,下垂曲线平移量均为0时,通过自治运行控制策略可以协调各配电网间的功率传输,各配电网均以相同的负荷率输出功率,动态响应良好。

2)仿真条件2,各配电网负荷量不变,参数如附录A表A3所示。时段1,各下垂曲线平移量均为0;时段2,中压交、直流配电网下垂曲线平移量 k_1 , k_2 分别增大到0.5,0.4;时段3,中压直流配电网下垂曲线平移量 k_2 增大到0.6,仿真结果如附录A图A5所示。

各配电网下垂曲线平移量及负荷率变化如表2所示。可见,在时段1时,各下垂曲线平移量为0,各配电网按照相同的负荷率输出功率。在时段2时,中压交、直流配电网下垂曲线平移量 k_1 , k_2 分别变为0.5,0.4,此时,根据式(11)计算出的负荷率与仿真结果一致,中压交、直流配电网的负荷率均有所增大,高于低压交、直流配电网,中压交流配电网的负荷率高于中压直流配电网。在时段3时,中压直流配电网下垂曲线平移量 k_2 增大到0.6,中压交、直流配电网的负荷率仍高于低压交、直流配电网,但此时中压直流配电网的负荷率高于中压交流配电网。由仿真结果可以看出,通过自治运行控制策略可以协调各配电网间的功率传输,实现不同电压等级配电网能量的协调管理,且通过改变下垂曲线的平移量,可以使各配电网按照需求对负荷率进行调整。

表2 各种配电网下垂曲线平移量及负荷率变化
Table 2 Droop curve shifting and load rate of each kind distribution network

配电网	下垂曲线平移量			负荷率/%		
	时段1	时段2	时段3	时段1	时段2	时段3
中压交流	0	0.5	0.5	62.5	73.5	70.3
中压直流	0	0.4	0.6	62.5	68.5	75.3
低压交流	0	0	0	62.5	48.5	45.3
低压直流	0	0	0	62.5	48.5	45.3

5 结语

本文根据孤岛模式下配电网的运行特性,提出了一种应用于孤岛模式的PET自治运行控制策略,通过建立全局化的多端口传输模型,根据端口特征信号,实现多端口的标么化,通过仿真对本文所提的自治运行控制策略进行了验证,结果表明该控制策略可以不依靠上层控制,充分发挥PET各个端口能量互通,相互支撑的优势,实现配电网的自治运行。但此方法的局限性在于由于多端口传输模型的限制,各个端口无法解耦,还有待于进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com>).

[com/aeps/ch/index.aspx](http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

[1] 汤广福,罗湘,魏晓光.多端直流输电与直流电网技术[J].中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.

[2] 李岩,罗雨,许树楷,等.柔性直流输电技术:应用、进步与期望[J].南方电网技术,2015,9(1):7-13.
LI Yan, LUO Yu, XU Shukai, et al. VSC-HVDC transmission technology: application, advancement and expectation [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 7-13.

[3] 廖国虎,邱国跃,袁旭峰.电力电子变压器研究综述[J].电测与仪表,2014,51(16):5-10.
LIAO Guohu, QIU Guoyue, YUAN Xufeng. Summary of the power electronic transformer research [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(16): 5-10.

[4] 卢子广,赵刚,杨达亮,等.配电网电力电子变压器技术综述[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(5):48-54.
LU Ziguang, ZHAO Gang, YANG Daliang, et al. Overview of research on power electronic transformer in distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(5): 48-54.

[5] 邓卫华,张波,胡宗波.电力电子变压器电路拓扑与控制策略研究[J].电力系统自动化,2003,27(20):40-44.
DENG Weihua, ZHANG Bo, HU Zongbo. Research on the topology and control scheme of power electronic transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 40-44.

[6] 廖国虎,袁旭峰,邱国跃.配电网电力电子变压器仿真研究[J].电测与仪表,2014,51(17):35-41.
LIAO Guohu, YUAN Xufeng, QIU Guoyue. Research on the simulation of the power electronic transformer in the distribution network [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(17): 35-41.

[7] 陈启超,王建曌,纪延超.基于 LLC 谐振变换器的电力电子变压器[J].电力系统自动化,2014,38(3):41-46. DOI: 10.7500/AEPS201211028.
CHEN Qichao, WANG Jianze, JI Yanchao. Power electronic transformer based on LLC resonant converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 41-46. DOI: 10.7500/AEPS201211028.

[8] 刘教民,孙玉巍,李永刚,等.级联式电力电子变压器混合脉宽调制谐波分析及均衡控制[J].电力系统自动化,2017,41(7):101-107. DOI:10.7500/AEPS20160624013.
LIU Jiaomin, SUN Yuwei, LI Yonggang, et al. Harmonic analysis and balancing control of cascade power electronic transformer based on hybrid pulse width modulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 101-107. DOI: 10.7500/AEPS20160624013.

[9] 李子欣,王平,楚遵方,等.面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究[J].电网技术,2013,37(9):2592-2601.
LI Zixin, WANG Ping, CHU Zunfang, et al. Research on medium-and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer[J]. Power System Technology, 2013,

37(9): 2592-2601.

[10] 孙广星, 苟锐锋, 孙伟. 基于 MMC 结构的电力电子变压器拓扑结构及控制策略研究[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 142-147.
SUN Guangxing, GOU Ruifeng, SUN Wei. Research on topology and control strategy of power electronic transformer based on MMC structure[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 142-147.

[11] 兰征, 涂春鸣, 肖凡, 等. 电力电子变压器对交直流混合微网功率控制的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 50-57.
LAN Zheng, TU Chunming, XIAO Fan, et al. The power control of power electronic transformer in hybrid AC-DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 50-57.

[12] LOH P C, LI D, CHAI Y K, et al. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2214-2223.

[13] JIANG Z, YU X. Power electronics interfaces for hybrid DC and AC-linked microgrids[C]// IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, May 17-20, 2009, Wuhan, China: 730-736.

[14] 赵昕, 赵成勇, 李广凯, 等. 采用载波移相技术的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 48-55.
ZHAO Xin, ZHAO Chengyong, LI Guangkai, et al. Submodule capacitance voltage balancing of modular multilevel converter based on carrier phase shifted SPWM technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 48-55.

[15] 杨晓峰, 郑琼林. 基于 MMC 环流模型的通用环流抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 59-65.
YANG Xiaofeng, ZHENG Qionglin. A novel universal circulating current suppressing strategy based on the MMC circulating current model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 59-65.

[16] 陈武, 阮新波, 颜红. DC/DC 多模块串并联组合系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 93-102.
CHEN Wu, RUAN Xinbo, YAN Hong. Control strategy for DC/DC multiple modules series-parallel combined systems[J].

Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(7): 93-102.

[17] 顾和荣, 王德玉, 沈虹, 等. 三相四桥臂逆变器控制技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 41-46.
GU Herong, WANG Deyu, SHEN Hong, et al. Research on control scheme of three-phase four-leg inverter [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 41-46.

[18] 荆龙, 黄杏, 吴学智. 改进型微源下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 145-152.
JING Long, HUANG Xing, WU Xuezhi. Research on improved microsource droop control method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 145-152.

[19] 关雅娟, 邬伟扬, 郭小强. 微电网中三相逆变器孤岛运行控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 52-60.
GUAN Yajuan, WU Weiyang, GUO Xiaoqiang. Control strategy for three-phase inverters dominated microgrid in autonomous operation [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(33): 52-60.

[20] 程军照, 李澍森, 吴在军, 等. 微电网下垂控制中虚拟电抗的功率解耦机理分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 27-32.
CHENG Junzhao, LI Shusen, WU Zaijun, et al. Analysis of power decoupling mechanism for droop control with virtual inductance in a microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 27-32.

张怀天(1994—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向: 新能源发电与模块化多电平变流器。E-mail: 16121573@bjtu.edu.cn

荆 龙(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向: 新能源并网技术与微网变流器。E-mail: ljing@bjtu.edu.cn

吴学智(1975—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向: 新能源并网技术、微网系统及大功率电机控制技术。E-mail: xzhwu@bjtu.edu.cn

(编辑 万志超)

Control Strategy for Autonomous Operation of Power Electronic Transformer

ZHANG Huaitian¹, JING Long¹, WU Xuezhi², WANG Shuai¹

(1. National Active Distribution Network Technology Research Center (Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China;
2. Collaborative Innovation Center of Electric Vehicles in Beijing, Beijing 100044, China)

Abstract: According to the operating characteristics of distribution network in the islanded mode, an autonomous operation control strategy applied to the islanded mode is proposed for the power electronic transformer (PET) applied to the AC/DC distribution network. By establishing a globalized multi-port transmission model, the operation status of each port is unified and the energy exchange of each port is coordinated to give full play to the energy exchange and support of each port, and achieve the autonomous operation of PET. The simulation system of AC/DC distribution network with PET is built and the effectiveness of the control strategy is verified.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No.2016YFB0900505).

Key words: AC/DC distribution network; power electronic transformer (PET); autonomous operation; multi-port transmission model