

# 基于电力电子变压器的交直流混合 配电网功率-电压协调控制

刘向龙<sup>1</sup>, 刘友波<sup>1</sup>, 张宸宇<sup>2</sup>, 陈 亮<sup>2</sup>, 刘俊勇<sup>1</sup>, 柳 丹<sup>2</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;  
2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:**传统交流配电网柔性调控能力不足,限制了分布式可再生能源(DER)的充分消纳和高效利用,DER 接入引发的节点电压异常波动就是重要表现。利用双向多端口的电力电子变压器(PET)构建交直流混合配电系统可以实现灵活组网、减少交直流电量变换环节同时极大地增强对系统潮流调控能力,是解决 DER 在配网层面高比例接入的重要方案。本文对 PET 的拓扑结构、组网形式及控制模型进行研究,提出一种 PET 稳态模型,该模型集成了多个不同电压等级的交直流端口,且每个端口均可独立控制传输功率与端口电压,有利于主从或下垂控制等控制策略的实施。进一步提出了以交直流系统节点电压偏移最小为目标的 PET 功率-电压协调控制方法,对交直流混合配电算例系统的计算分析表明,交直流混合系统中的 PET 可以通过灵活、快速的端口功率控制,显著改善系统电压越限、应对分布式电源的出力波动,从而提高分布式电源渗透率、促进可再生能源的就地消纳。

**关键词:**交直流混合配电网;分布式电源;运行优化;电力电子变压器;功率-电压控制

**DOI:** 10. 12067/ATEEE1805020      **文章编号:** 1003-3076(2019)02-0035-09      **中图分类号:** TM71

## 1 引言

快速增长的可再生能源、储能系统以及电动汽车等新型负荷增加了配电网对智能能源管理的需求:①越来越多的分布式可再生能源(Distributed Energy Resource, DER)开始通过配网或微网的形式接入系统<sup>[1]</sup>;②主动响应式负荷以及电动汽车等具有强用户交互性的新元素也不断接入配网,给荷端也引入了新的不确定性,传统的交流配电系统由于拓扑结构以及控制手段的限制,无法对分布式电源出力与负荷的变化进行快速的跟踪响应,也不能对网络潮流分布进行精准连续的调节,很难满足源荷双端强不确定性<sup>[2]</sup>条件下对配电系统灵活、快速、连续和精准的功率电压调控要求。

引入直流配电技术建立交直流混合配电系统是应对这一挑战的重要手段,直流系统不存在功角稳

定问题以及无功问题,无需跟踪频率与电压相角变化,更适合电力电子装置发挥其快速的响应以及精准解耦控制等特性以应对分布式电源快速频繁的出力波动,从而避免了在传统交流系统中对这些不可控源进行限制和隔离的做法,促进 DER 的充分消纳。另外,采用直流供电直流负荷,可以省去大量交直流转换环节,提高能效。交直流混合配网的系统架构有很多种,其中美国北卡罗来纳大学于 2011 年提出的“The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management, (FREEDM)”型交直流混合配电系统<sup>[3]</sup>是一种发展前景较好的系统架构,在 FREEDM 系统中,直流配电网主要用于集成分布式电源单元、分布式储能单元及直流负载等,并通过智能能量管理(Intelligent Energy Management, IEM)装置与交流配网相连。IEM 装置集成了能量转换系统、控制系统以及信息处理系统,不仅可以同时连接

**收稿日期:** 2018-05-09  
**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFB0903300)  
**作者简介:** 刘向龙(1994-),男,内蒙古籍,硕士研究生,研究方向为交直流混合配电网运行控制;  
刘友波(1984-),男,四川籍,副教授,博士,研究方向为主动配电网运行与规划。

多个交流配网与直流配网,同时还能在态势感知的基础上对各交直流端口进行高精度控制,是FREEDM 型交直流混合系统的核心。

电力电子变压器<sup>[4]</sup>(Power Electronic Transformer, PET)能够实现对其各端口传输功率与电压的独立、快速、准确控制,集成控制系统与信息系统后可作为 IEM 装置。与常规的电压/电流源转换器和低频变压器(Low Frequency Transformer, LFT)相比, PET 具有多个优点,例如:无功补偿、即插即用的储能、直流负载即分布式发电直流接口、动态电压控制以及故障电流的主动限制。目前的研究主要集中在 PET 的内部结构设计,组件级仿真和控制器设计等方面,文献[5]提出了一种不需要电力电子变压器和变电站之间的任何通信在本地进行控制决策的在线动态电压无功控制(Voltage Vector Control, VVC)算法,通过电力电子变压器注入或吸收无功功率来调节母线电压;文献[6]则介绍了一种与储能配合的 PET 动态功率路由策略。

然而,当前基于稳态模型的运行控制研究还比较少,主要原因是 PET 的拓扑结构、运行特性和控制方法均没有形成统一的标准,文献[7]介绍了 PET 的数十种不同的拓扑及其控制方法、技术标准、模块功能。而且由于稳态建模时侧重的运行特性可能不同,因此 PET 稳态模型也形式多样,文献[8]利用集成电池组的三端子隔离 PET 实现了电网间的潮流控制;文献[9]则提出了将双端口 PET 的稳态运行模式分为负载模式与电源模式建立其 OPENDSS 潮流计算模型;文献[10]提出了基于 PET 的多端口能量路由器的稳态潮流计算模型,文献[11]在文献[9]所提模型的基础上,探索了能量路由器在电力系统运行优化中的应用,这种忽略内部结构约束,将端口等效为换流器的稳态建模方法对于快速计算及扩展应用场景具有借鉴意义,但是文献[9]中的模型未考虑直流端口的建模,而且每个 PET 的各个端口仅能集成两个电压等级,并没有全面的表征以 PET 为底层设备的能量路由器的稳态特性。

本文建立了一种包含多个交/直流端口的 PET 潮流计算模型,同时提出了含有这种多端口 PET 的最优潮流模型,与传统最优潮流模型相比,多端口 PET 为控制电力系统提供了额外的灵活性,算例分析通过对比优化前后的电压越限情况证明了这种灵活调控方式的高效性。

2 多端口 PET 的稳态运行模型

2.1 多端口 PET 的典型拓扑结构及其组网形式

目前,常见的电力电子变压器内部拓扑主要为两种:高频交流链型<sup>[12]</sup>和级联 H 桥型<sup>[13]</sup>,结构分别如图 1 和图 2 所示。

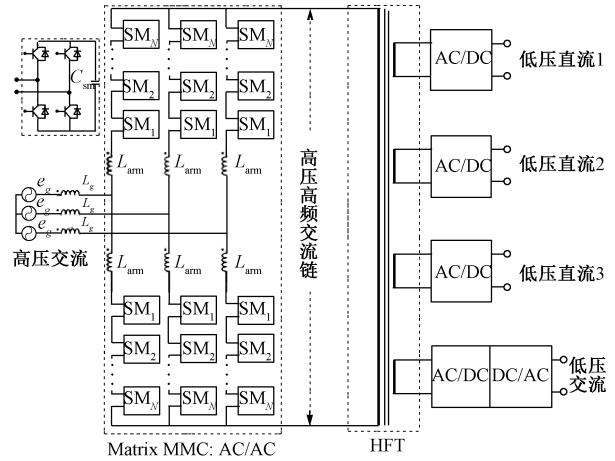


图 1 高频交流链型多端口 PET 拓扑结构

Fig. 1 Configuration of high-frequency AC chain PET

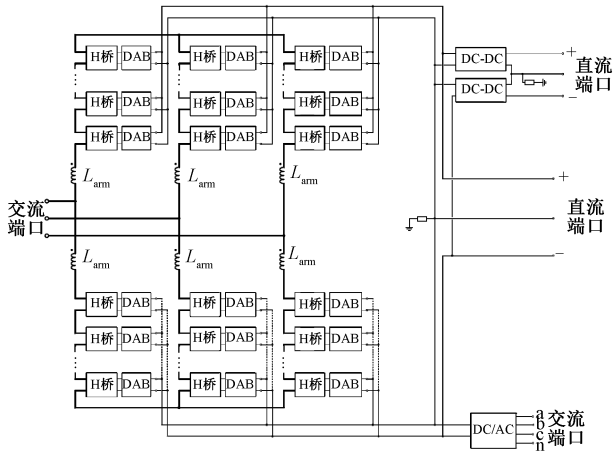


图 2 级联 H 桥型多端口 PET 拓扑结构

Fig. 2 Configuration of cascaded H-bridge PET

高频交流链型 PET 电路拓扑在高压侧采用了模块化多电平矩阵变换器( Modular Multilevel Matrix Converter, MMC),其 a、b、c 三相端口与三相高压交流电网相连,低压直流功率子单元由谐振回路、高频变压器(High Frequency Transformer, HFT)和全桥电路构成,可实现由高频交流与低压直流的电能变换,中间层产生单相中高频交流电压,可直接实现高压交流与高频交流的电能变换。

级联 H 桥型 PET 则采用输入级串联,中间级高

频变压器电磁隔离,输出级并联的结构,这两种典型结构均属于多电平结构,前者交直流转换环节相对较少,因此建造体积更小、效率更高,适合在低压配电网中使用。后者交直流转换环节多,体积和容量均比较大,更适合在高压配电网和输电网中使用。由于高频交流链型 PET 的制作工艺还不太成熟,因此目前级联 H 桥型 PET 在实际工程应用中研究更多,本文所建立的多端口 PET 稳态模型即基于级联 H 桥式(如图 2 所示)这种功率转换结构。

理想的多端口 PET 可以有多个具有不同电压等级的交流或直流端口,交流端口连接交流子网/微网和交流型分布式电源、直流端口则主要连接直流子网/微网、直流型分布式电源及直流负荷,其基本架构如图 3 所示。

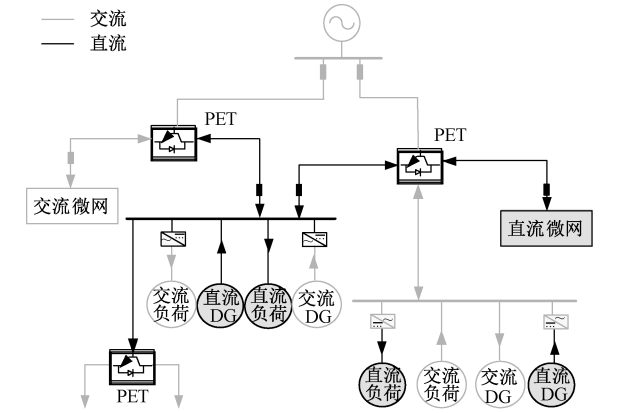


图 3 含有 PET 的交直流混合配电网结构

Fig. 3 Configuration of AC-DC hybrid distribution system embedded with PET

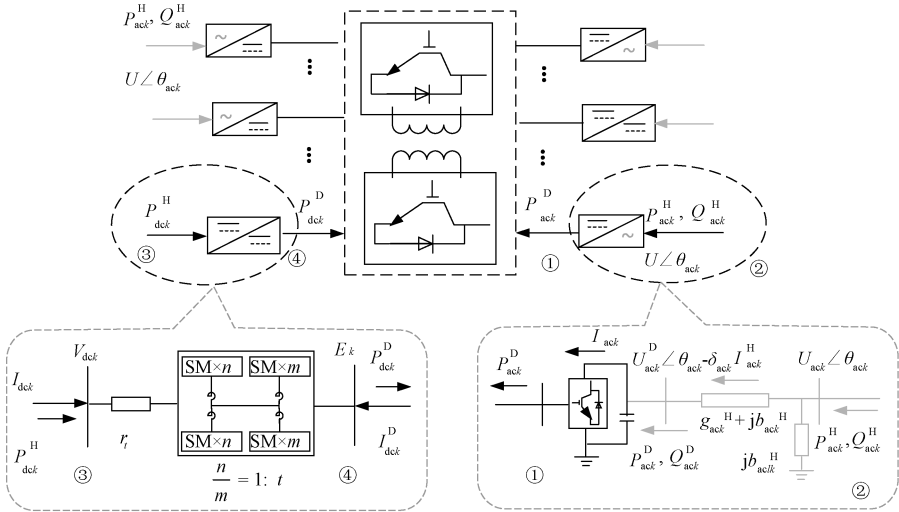


图 5 多端口 PET 的广义稳态模型

Fig. 5 Generalized steady-state model of multi-port PET

## 2.2 多端口 PET 的潮流计算模型

理想的多端口电力电子变压器可以集成多个不同电压等级的交流端口和直流端口,每个端口的功率均可双向流动,如图 4 所示。

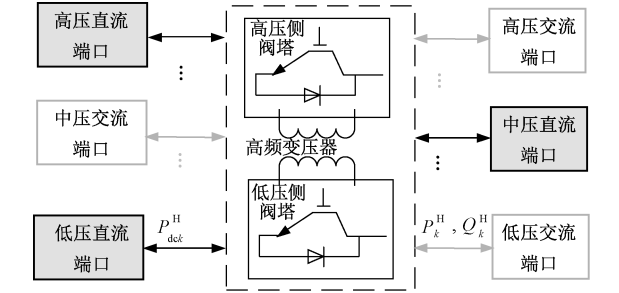


图 4 多端口 PET 结构示意图

Fig. 4 Structure of multi-port PET with multi-voltage level

由于潮流计算模型中不需要考虑电力电子变压器复杂的内部拓扑约束,仅关注端口的功率-电压控制特性,故多端口 PET 的潮流计算模型可以解耦等效为由 AC-DC 转换器、DC-DC 转换器和功率平衡节点构成的简化模型如图 5 所示。

假定电力电子变压器具有交流端口(以  $\Phi$  标记)和直流端口(以  $\Psi$  标记)共计  $M$  个端口,则其模型可由式(1)~式(8)表述。

$$P_{ack}^H = g_{ack}^H (U_{ack}^H)^2 - (g_{ack}^H \cos \delta_{ack} + b_{ack}^H \sin \delta_{ack}) U_{ack}^H U_{ack}^D \quad (1)$$

$$Q_{ack}^H = - (b_{ack}^H + b_{ack}^H) + (b_{ack}^H \cos \delta_{ack} - g_{ack}^H \sin \delta_{ack}) \cdot U_{ack}^H U_{ack}^D \quad (2)$$

$$P_{ack}^D = E_{ack} I_{ack} = -g_{ack}^H (U_{ack}^D)^2 + (g_{ack}^H \cos \delta_{ack} - b_{ack}^H \sin \delta_{ack}) U_{ack}^H U_{ack}^D \quad (3)$$

$$E_{ack} = w_{ack} U_{ack}^D \quad (4)$$

$$E_{dck}/t + r_t I_{dck} = U_{dck}^H \quad (5)$$

$$P_{dck}^D = -E_{dck} I_{dck}^D = E_{dck} I_{dck}/t \quad (6)$$

$$P_{dck}^H = 2U_{dck}^H \sum_{j \in N} Y_{dej} (U_{dck}^H - U_{dej}) + U_{dck}^H I_{dck} \quad (7)$$

$$\sum_{k \in \Phi} P_{ack}^D + \sum_{k \in \Psi} P_{dck}^D = \Delta P_{loss} \quad (8)$$

其中交流端口可由式(1)~式(4)描述,直流端口由式(5)~式(8)描述,上标 H 表示网络侧即 AC-DC 转换器远端交流网络节点(图 5 中②节点)或 DC-DC 转换器的二次侧连接直流节点(图 5 中④节点),上标 D 表示 PET 端口侧即 AC-DC 转换器的近端(图 5 中①节点)交流节点或 DC-DC 转换器的一次侧端口节点(图 5 中③节点)。

在交流端口: $P_{ack}^H$  和  $Q_{ack}^H$  为电力电子变压器交流端口  $k$  处的注入有功和注入无功功率; $U_{ack}^D$  为交流端口  $k$  处的端口侧交流节点电压幅值; $U_{ack}^H$  为交流端口  $k$  处的网络侧交流节点的电压幅值; $\delta_{ack}$  为该交流端口转换器端口侧节点电压滞后网络侧节点电压的相角; $g_{ack}^H + j b_{ack}^H$  为交流端口功率损耗的等效导纳; $j b_{ack}^H$  为交流端口并联无功损耗的等效电纳; $E_{ack}$  为该交流端口 AC-DC 转换器直流侧电压; $I_{ack}$  为 AC-DC 转换器直流侧电流; $P_{ack}^D$  为交流端口与电力电子变压器的交换功率; $w_{ack}$  为等效综合电压控制系数,具体数值与直流侧的电压利用效率和整流器的调制度有关。

在直流端口: $U_{dck}^H$  为直流端口二次侧直流电压; $P_{dck}^H$  为直流端口所连网络注入直流端口的功率; $I_{dck}$  为直流端口 DC-DC 转换器二次侧电流; $P_{dck}^D$  为直流端口转换器一次侧与电力电子变压器的交换功率; $E_{dck}$  为直流端口转换器一次侧直流电压; $I_{dck}^D$  为直流端口转换器一次侧直流电流; $t$  为 DC-DC 转换器一二次侧直流电压变比; $r_t$  为直流端口功率损耗等效电阻; $\Delta P_{loss}$  为电力电子变压器内部静态损耗。

2.3 多端口电力电子变压器的控制模式

本模型的控制变量包括: $P_{ack}^H$ 、 $Q_{ack}^H$ 、 $U_{ack}^H$ 、 $U_{dck}^H$ 、 $P_{dck}^H$  即端口的传输功率与端口电压值。PET 的每个端口都可以具有不同的控制模式,可以独立控制它们连接节点的电压与该端口的传输功率。由于端口转换器的电流解耦控制,有功功率和无功功率可以独立控制。PET 的工作模式如表 1 所示。交流端口

可以控制端口传输有功功率( $P_{ack}^H$  恒定)或无功功率( $Q_{ack}^H$  恒定)为一定值,保持所连交流节点电压幅值不变( $U_{ack}^H$  恒定),并且有功功率控制模式和无功功率控制模式可以任意组合。直流端口可以将端口传输有功功率( $P_{dck}^H$  恒定)和直流电压( $U_{dck}^H$  恒定)控制为某个固定值,或者使其根据下垂控制规律( $P_{dck}^H - U_{dck}^H$  下垂控制)变化。

表 1 PET 的端口运行控制模式

Tab. 1 Operating mode of PET

	模式编号	有功控制	无功控制
交流端口	1	$P_{ack}^H$ 恒定	$Q_{ack}^H$ 恒定
	2	不控制	$U_{ack}^H$ 恒定
直流端口	1	$U_{dck}^H$ 恒定	无
	2	$P_{dck}^H$ 恒定	无
	3	$P_{dck}^H - U_{dck}^H$ 下垂	无

这些控制模式对应的控制方程如表 2 所示。带有下标 set 表示端口的控制变量设定值, $K$  表示下垂控制系数即  $P_{dck}^H - U_{dck}^H$  的变化斜率,下垂系数  $K$  也是 PET 模型的控制变量。当网络中含有多个 PET 时,直流端口采取的控制策略包括主从控制与下垂控制,主从控制时,往往需要选择一个 PET 的直流端口采用定直流电压( $U_{dck}^H$  恒定)控制,以保持直流节点电压跟踪电压设定值,同时也作为直流网络功率平衡站,维持直流电压和功率的平衡。下垂控制则可通过各 PET 直流端口的直流功率和直流电压之间的斜率关系约束来实现直流电压设定值的自动协调和各个直流端口间功率的自动分配。

表 2 PET 端口控制方程

Tab. 2 Operating mode of PET

控制模式	控制方程
$P_{ack}^H$ 恒定	$P_{ack}^H - P_{ack, set}^H = 0$
$Q_{ack}^H$ 恒定	$Q_{ack}^H - Q_{ack, set}^H = 0$
$U_{ack}^H$ 恒定	$U_{ack}^H - U_{ack, set}^H = 0$
$U_{dck}^H$ 恒定	$U_{dck}^H - U_{dck, set}^H = 0$
$P_{dck}^H$ 恒定	$P_{dck}^H - P_{dck, set}^H = 0$
$P_{dck}^H - U_{dck}^H$ 下垂	$P_{dck}^H - P_{dck, set}^H = K (U_{dck}^H - U_{dck, set}^H)$

3 含 PET 的交直流混合配电网功率-电压协调控制模型

3.1 目标函数

可再生能源的波动性在高渗透率接入电力系统后对系统影响更大,主要表现为可再生能源接入比例较高的情况下,节点电压过载的概率较大<sup>[14]</sup>,而当电压出现越限时,系统不得不限制分布式电源的



接入甚至切除一部分负荷,因此本文运行优化的目标是电压调节,即使用 PET 的灵活控制资源优化节点电压分布,以便于在分布式电源出力快速波动的情况下及时调整性能。因此,目标函数如下:

$$\min F = \sum_{i=1}^n |U_{aci} - U_{acN}| \quad (9)$$

式中,  $U_{aci}$  为第  $i$  个交流节点电压值;  $U_{acN}$  为该节点电压额定值;该目标函数  $F$  表明 PET 控制的目标是在电网处于越限风险时,将所有交流节点上的电压偏移最小化。

### 3.2 等式约束条件

(1) PET 端口功率平衡:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ack}^H &= P_{ack}^H - g_{ack}^H (U_{ack}^H)^2 - \\ & (g_{ack}^H \cos \delta_{ack} + b_{ack}^H \sin \delta_{ack}) U_{ack}^H U_{ack}^D = 0 \quad (10) \\ \Delta Q_{ack}^H &= Q_{ack}^H + (b_{ack}^H + b_{ack}^H) (U_{ack}^H)^2 - \\ & (b_{ack}^H \cos \delta_{ack} - g_{ack}^H \sin \delta_{ack}) U_{ack}^H U_{ack}^D = 0 \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{dck}^H &= P_{dck}^H - 2U_{dck}^H \sum_{j=1}^N Y_{dej} (U_{dck}^H - U_{dej}^H) + \\ & U_{dck}^H I_{dck} = 0 \quad (12) \end{aligned}$$

式(10)、式(11)、式(12)即电力电子变压器模型中的式(1)、式(2)、式(7)变换,  $m$  为直流网络节点数量将表 2 中不同控制模式对应的控制方程相应代入就得到了 PET 的端口功率平衡控制约束,描述了其端口控制参数调整遵循的规律,通过控制其中  $P_{ack}^H$ 、 $Q_{ack}^H$ 、 $U_{ack}^H$ 、 $U_{dck}^H$ 、 $P_{dck}^H$  和  $K$  这几个变量的变化规律执行端口控制策略,比如本模型中,为了使系统中处于越限风险的交流节点特别是放射状结构末端节点电压偏移最小,可以通过控制端口电压或提供无功补偿来维持 PET 所连交流节点与 PET 端口交换功率  $P_{ack}^H$  和对应节点电压  $U_{aci}$ ,采取这种控制策略的端口可以等效为一个 PV 节点,同时也需要松弛一个节点的有功功率控制以平衡 PET 功率损耗。

(2) PET 交换功率平衡:

$$\begin{aligned} \Delta P_s &= \sum_{k \in \Phi} [-g_{ack}^H (U_{ack}^D)^2 + (g_{ack}^H \cos \delta_{ack} - b_{ack}^H \sin \delta_{ack}) \cdot \\ & U_{ack}^H U_{ack}^D] + \sum_{k \in \Psi} U_{dck}^H I_{dck} - r_{dck} I_{dck}^2 - \Delta P_{loss} \quad (13) \end{aligned}$$

将 PET 模型中的式(3)、式(5)、式(6)代入式(8)中即得到式(13),描述了 PET 各端口交换功率流入量与流出量的平衡。

(3) 交流网络与直流网络的功率平衡约束:

$$\Delta P_{aci} = P_{aci} - U_{aci} \sum_{j=1}^n U_{acj} (B_{acij} \sin \theta_{acij} + G_{acij} \cos \theta_{acij}) = 0$$

$$\Delta Q_{aci} = Q_{aci} - U_{aci} \sum_{j=1}^n U_{acj} (G_{acij} \sin \theta_{acij} - B_{acij} \cos \theta_{acij}) = 0 \quad (15)$$

$$\Delta P_{dci} = P_{dci} - p U_{dci} \sum_{j=1}^m Y_{dej} (U_{dci} - U_{dej}) = 0 \quad (16)$$

式(14)~式(16)为与 PET 端口没有直接连接的交流网络和直流网络的功率平衡方程,其中,  $n$  为交流节点数量。由于配网不同于输电网,其节点电压受运行状态及负荷变化的影响大,所以式(14)与式(15)中的  $P_{aci}$  和  $Q_{aci}$  不宜继续使用恒功率负荷模型,在本文的模型中,近似认为负荷为 ZIP 混合模型,即:

$$P_{aci} = (\alpha_{aci} U_{aci}^2 + \beta_{aci} U_{aci} + \gamma_{aci}) P_{aci0} \quad (17)$$

$$Q_{aci} = (\alpha_{aci} U_{aci}^2 + \beta_{aci} U_{aci} + \gamma_{aci}) Q_{aci0} \quad (18)$$

式中,  $P_{aci}$  和  $Q_{aci}$  分别为交流节点  $i$  的有功和无功注入量;  $P_{aci0}$  和  $Q_{aci0}$  为额定电压下节点  $i$  的有功和无功注入量;  $\alpha_{aci}$ 、 $\beta_{aci}$ 、 $\gamma_{aci}$  分别为恒阻抗负荷、恒电流负荷及恒功率负荷的比例且  $\alpha_{aci} + \beta_{aci} + \gamma_{aci} = 1$ ,将式(17)、式(18)代入式(14)和式(15)得到配网中的功率平衡方程。

### 3.3 不等式约束条件

(1) 交流和直流网络的线路传输功率上下限约束:

$$0 \leq S_{acij} \leq S_{AC}^{\max} \quad (19)$$

$$0 \leq P_{deij} \leq P_{DC}^{\max} \quad (20)$$

式中,  $S_{acij}$  为交流节点  $i$  和交流节点  $j$  之间的交流线路传输复功率;  $S_{AC}^{\max}$  为交流线路最大传输容量;  $P_{deij}$  为节点  $i$  和节点  $j$  之间的直流线路传输功率;  $P_{DC}^{\max}$  为直流线路最大传输容量。

(2) 交流端口复功率上下限约束:

$$0 \leq S_{ack}^H \leq S_{ack}^{H\max} \quad (21)$$

式中,  $S_{ack}^H$  为交流端口  $k$  的传输功率;  $S_{ack}^{H\max}$  为该交流端口的最大传输容量。

(3) 直流端口传输功率上下限约束:

$$P_{dck}^{\min} \leq P_{dck} \leq P_{dck}^{\max} \quad (22)$$

式中,  $P_{dck}$  为直流端口  $k$  的传输功率;  $P_{dck}^{\max}$  和  $P_{dck}^{\min}$  分别为该端口传输功率的上下限值。

(4) 本模型中涉及的其他变量和参数的上下限:

$$\left\{ \begin{aligned} u_{ac}^{\min} &\leq U_{aci} \leq u_{ac}^{\max} \\ S_{\min} &\leq S_{aci} \leq S_{\max} \\ K_{dc}^{\min} &\leq K_{dck} \leq K_{ac}^{\max} \\ U_{dc}^{\min} &\leq U_{dci} \leq U_{dc}^{\max} \\ \delta_{aci}^{\min} &\leq \delta_{aci} \leq \delta_{aci}^{\max} \\ w_{ac}^{\min} &\leq w_{ack} \leq w_{ac}^{\max} \end{aligned} \right. \quad (23)$$

式中,  $U_{aci}$  为第  $i$  个交流节点电压值;  $u_{ac}^{\max}$  和  $u_{ac}^{\min}$  为该节点电压上下限;  $S_{aci}$  为第  $i$  个交流节点注入功率;  $S_{\max}$  和  $S_{\min}$  为该节点注入功率上下限;  $K_{dck}$  为直流端口  $k$  的下垂控制系数;  $K_{dc}^{\min}$  和  $K_{dc}^{\max}$  为下垂系数的上下限;  $\delta_{aci}$  为节点  $i$  处电压的相角;  $\delta_{aci}^{\max}$  和  $\delta_{aci}^{\min}$  为该节点电压相角的上下限;  $U_{dci}$  为直流节点  $i$  的电压;  $U_{dc}^{\max}$  和  $U_{dc}^{\min}$  为该节点电压的上下限;  $w_{ack}$  为等效综合电压控制系数;  $w_{ac}^{\max}$  和  $w_{ac}^{\min}$  为其上下限。

3.4 模型说明

本模型的优化变量即 PET 端口控制参数的设定值,包括 PET 端口传输功率  $P_{ack}^H$ 、 $Q_{ack}^H$  和  $P_{dck}^H$ 、端口电压  $U_{ack}^H$  和  $U_{dck}^H$  及直流端口下垂控制系数  $K_{dck}$ 。与传统 OPF 模型相比,含有 PET 模型的 OPF 引入了直流状态变量,因此求解优化变量空间更加复杂,同时 PET 模型的加入也使得优化模型的非线性特征更加凸显,如式 (19) ~ 式 (21) 中二次项、一次项以及正余弦项的耦合,本文更侧重于建模,因此选用商业优化工具 IPOPT 直接求解模型,需要指出的是,与传统的 OPF 模型类似,使用 IPOPT 也将面临收敛问题,为了解决收敛问题,算例中将预先选择初始值。

4 算例分析

为了验证所提模型的可行性和正确性,将 IEEE 33 节点系统修改为交直流混合配电系统进行仿真分析。如图 6 所示,四端口 PET 和三端口 PET 分别连接到 IEEE 33 节点系统的节点 3 和网络的末端。两个 PET 都有一个直流端口连接到分布式电源。原网络中的备用联络线路也保留下来,以便将 PET 的调压效果与配网重构负荷转供时的电压调节效果进行比较,交流系统额定电压 12.66kV,直流节点额

定参考负载为 3715+j2300kV·A。IEEE33 节点系统的详细参数可参见文献[15]。

原交流系统节点 7 和 23 接入双馈异步风机机组(交流型 DG),额定功率为 400kW,功率因数为 0.9,节点 13 和 29 接入 2 台微型燃气轮机,额定功率均为 100kW,功率因数为 0.85。

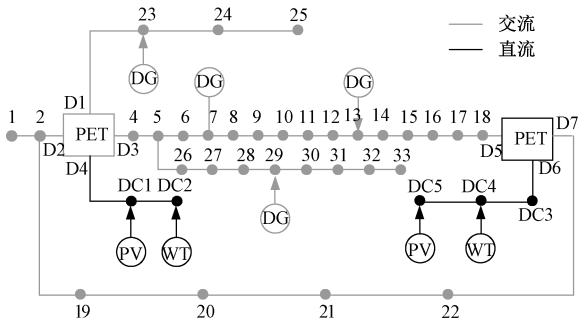


图 6 含 PET 的 IEEE 33 节点交直流混合配电系统  
Fig. 6 Modified IEEE 33 AC-DC hybrid power distribution system with PETs

PET 具有 80kW 的静态有功功率损耗,并且每个交流端口可以提供最大 20kVar 的无功功率补偿。直流线都使用 ACSR240 电缆,相邻直流节点之间的距离为 6km,直流额定电压为 15kV。DC3 的直流负荷为 300kW。DC1 和 DC5 节点安装光伏发电,额定功率为 150kW,DC2 和 DC4 节点安装直流型风电机组,额定功率为 200kW。本文提出的优化模型在 MATLAB 2016a 平台上编程,结合商业优化工具集 IPOPT 进行求解。所有功率的基准容量为 100MV·A,电压均采用标幺值,流出 PET 端口为功率正方向。PET 的初始控制参数与优化后的端口控制参数如表 3 所示。

图 7 展示了 PET 对测试系统网络节点电压的调节效果,可以看到,系统负荷越重,网络节点特别

表 3 PET 端口控制参数优化前后对比

Tab. 3 Comparison of control parameters before and after optimization for PET ports										
端口	控制模式	初始端口参数 (pu)				优化后端口参数 (pu)				
		$P_{ack,set}^H/P_{dck,set}^H$	$Q_{ack,set}^H$	$U_{ack,set}^H/U_{dc,set}^H$	$K_{dck,set}$	$P_{ack,set}^H/P_{dck,set}^H$	$Q_{ack,set}^H$	$U_{ack,set}^H/U_{dc,set}^H$	$K_{dck,set}$	
D1	$P_{ack}^H$ 、 $Q_{ack}^H$ 恒定	0.94	0.45	—	—	0.62	0.36	—	—	
D2	$U_{ack}^H$ 恒定	—	—	0.960	—	—	—	0.982	—	
D3	$P_{ack}^H$ 、 $Q_{ack}^H$ 恒定	2.36	1.68	—	—	1.06	0.78	—	—	
D4	$P_{dck}^H$ 、 $U_{dck}^H$ 下垂	—	0	—	25	—	0	—	—	23.74
D5	$P_{ack}^H$ 、 $Q_{ack}^H$ 恒定	-0.08	-0.06	—	—	0.12	-0.06	—	—	
D6	$P_{dck}^H$ 、 $U_{dck}^H$ 下垂	—	0	—	33	—	0	—	—	30.27
D7	$P_{ack}^H$ 、 $Q_{ack}^H$ 恒定	-0.07	-0.04	—	—	0.11	-0.04	—	—	

注:“—”表示该控制模式下不控制该参数。

是末端节点的电压偏移就越严重,PET 接入后,如图 7 中三角线所示,各节点电压偏移量减小,18 号末端节点电压得到了显著提升。为了对比不同控制模式对调压效果的影响,将 D3 的初始控制模式由  $P_{ack}^H$ 、 $Q_{ack}^H$  恒定控制改为  $P_{ack}^H$  恒定控制,初始设定值  $P_{ack,set}^H$  为 2.36,其余参数与表 3 中参数相同,其电压调整效果如图 7(圆点线)所示,可以看到各节点电压偏移量减少更加明显,节点电压抬升更加显著,主要是由于给端口不限定无功输出量,因此 PET 可以提供的无功支撑会更充裕更灵活。

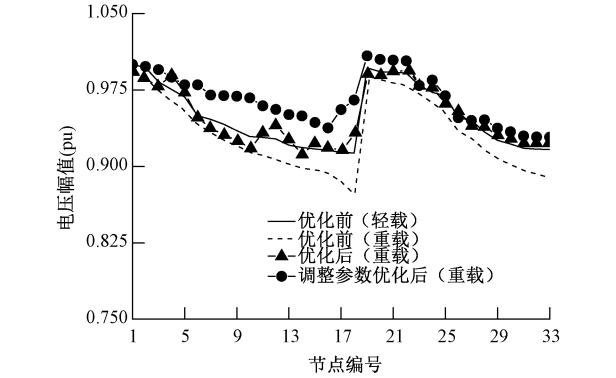


图 7 PET 对节点电压的调节效果对比  
Fig. 7 Voltage magnitudes of IEEE 33 with and without PET

为了验证 PET 对分布式电源出力动态变化引起的电压偏移的调节能力,又进行了时序的仿真测试,以 0.5h 作为时间步长,图 5 所示的测试系统中的分布式电源出力与负荷变化如图 8 所示,其中取功率因数为 0.9 计算出负荷无功功率对应曲线,分布式电源仅考虑有功出力。

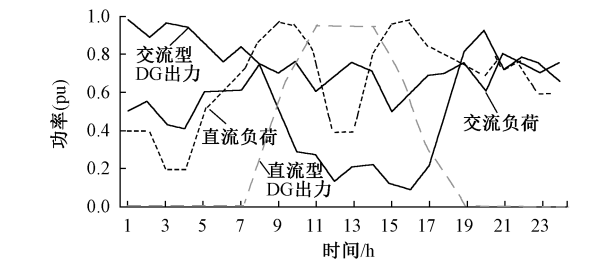


图 8 算例中分布式电源出力及负荷随时间变化关系  
Fig. 8 Loads and outputs of DGs

图 9 所示 3 条曲线分别为原交流网络(含交流型分布式电源)独立运行(不优化)、网络重构<sup>[16]</sup>和通过本文所提含 PET 的交直流混合配网结构及运行控制优化后的节点电压,所选节点为网络中电压偏移最大的节点,设定当节点电压超过 1.07pu 或低于 0.93pu 为电压越限。

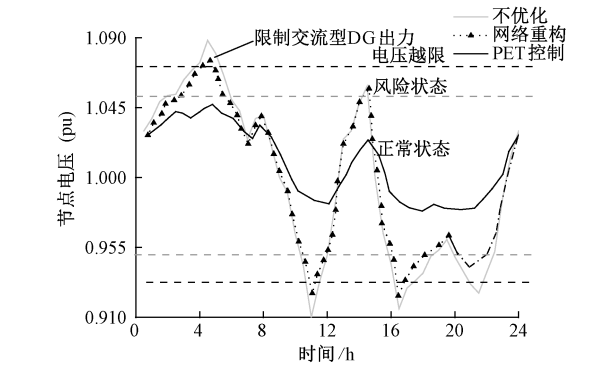


图 9 24h 电压动态调整结果对比  
Fig. 9 Voltage deviations of AC buses

从图 9 可以看出,不采取优化控制手段时,4:00-5:00 时电网中出现节点电压高于 1.07pu 越上限,这是由于负荷在夜间时段较低而风电机组晚上出力较大。

10:00-11:30 及 16:00-17:30 时电出现节点电压低于 0.93 pu,越下限,这是由于上午和傍晚负荷较重而分布式电源出力较小所导致。采用文献[16]提出的线路重构的方案后,节点电压越限情况有所改善,但是由于联络开关动作次数限制,网络重构无法实现连续的功率调节与电压调整,而且响应速度慢,可以看到,尽管执行了网络重构操作,下午和晚上仍出现了电压过低越下限的情况,而使用本文提出的 PET 运行控制优化模型,则可以使系统节点电压始终处于正常状态。

另外,当系统中的节点电压超出上限或者线路过载时,传统交流电网由于调控手段有限且线路容量小等特点,往往需要采取分布式电源切机等措施限制分布式电源的出力,因此 DG 渗透率极限较低,以电压上限 1.07pu 作为 DG 切机的极限,得到不同运行方案下分布式电源的最大渗透率如表 4 所示,当不优化时,最大 DG 渗透率约为 48%;采用重构方法时,最大 DG 渗透率约为 56%;采用所提交直流混合配电网控制模式时,最大 DG 渗透率约为 73%。在本文的假设条件下,渗透率超过 73%时,限制 DG 渗透率的主要因素变为线路的传输容量,而直流线路的传输容量通常大于绝缘规格相同的交流线路,所以采用直流线路接入分布式电源,可以提高 DG 渗透率极限。再加上 PET 的灵活功率调节能力,使网络负荷分配更加均衡、线路的最大传输功率也得到了提高,因此网络损耗有效减少,供电能力显著提高。而且 PET 端口可以分区分层提供连续、快速的无功补偿,补偿效果明显优于并联电容器投切等非

智能、非连续手段,因此 PET 的使用也可以节省无功补偿设备的投资。

表 4 不同运行优化方案的经济性数据对比

Tab.4 Comparisons of economic benefits

方案	DG 最大 渗透率 (%)	全网 全天损耗 /(kW·h)	最大 传输功率 /(MV·A)
不优化	48	7032	4.68
网络重构	56	4536	4.68
含 PET 交直流 混合配网	78	2760	6.72

5 结 论

本文提出一种广义的含有多个交直流端口的 PET 稳态模型,并根据端口运行控制模式,利用等效节点扩展了系统潮流模型,然后在此基础上,以减小交流系统节点电压偏移为目标,建立了包含电力电子化的变压器的运行优化模型,对改进的 IEEE 33 交直流混合配电系统的算例测试结果的分析表明,由于 PET 能够快速调节端口功率,因而能够随着分布式电源出力的突变而根据目标函数随之调节电压,使得电压保持在优质水平,所以通过控制 PET 的端口功率注入和端口电压,能够显著改善系统电压越限、应对分布式电源的出力波动,从而提高分布式电源渗透率、促进 DER 的就地消纳。

本文的运行控制模型说明 PET 能够以更智能更灵活的方式提高配电网的性能,研究 PET 在供电路径优化、阻塞管理等其他运行控制问题上的新方法新思路也是很有价值的,充分挖掘 PET 的灵活高效的控制优势,在此基础上可以进一步探究 PET 与分布式电源以及储能的联合规划、优化配置问题,促进 DER 的更充分利用。

参考文献 (References):

[ 1 ] 孔力,裴玮,叶华,等 (Kong Li, Pei Wei, Ye Hua, et al.). 交直流混合配电系统形态、控制与稳定性研究 (Review of pattern, control and stability for hybrid AC/DC distribution power systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (9): 1-10.

[ 2 ] 康重庆,姚良忠 (Kang Chongqing, Yao Liangzhong). 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架 (Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy) [J]. 电力系统自动化 (Automation of

Electric Power Systems), 2017, 41 (9): 2-11.

[ 3 ] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management system: The energy internet [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99 (1): 133-148.

[ 4 ] Alepuz S, González-Molina F, Martín-Arnedo J, et al. Development and testing of a bidirectional distribution electronic power transformer model [J]. Electric Power Systems Research. 2014, 107 (5): 230-239.

[ 5 ] Shah D, Crow M L. Online volt-var control for distribution systems with solid-state transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31 (1): 343-350.

[ 6 ] Hambridge S, Huang A Q, Yu R. Solid state transformer (SST) as an energy router: Economic dispatch based energy routing strategy [A]. Energy Conversion Congress and Exposition [C]. 2015. 2355-2360.

[ 7 ] Roasto I, Romero-Cadaval E, Martins J, et al. State of the art of active power electronic transformers for smart grids [A]. IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society [C]. 2012. 5241-5246.

[ 8 ] Roy S, De A, Bhattacharya S. Multi-port solid state transformer for inter-grid power flow control [A]. Power Electronics Conference [C]. 2014. 3286-3291.

[ 9 ] Guerra G, Martínez-Velasco J A. A solid state transformer model for power flow calculations [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2017, 89: 40-51.

[ 10 ] Miao J, Zhang N, Kang C. Generalized steady-state model for energy router with applications in power flow calculation [A]. 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting [C]. 2016. 1-5.

[ 11 ] 苗键强,张宁,康重庆 (Miao Jianqiang, Zhang Ning, Kang Chongqing). 能量路由器对于配电网运行优化的影响分析 (Analysis on the influence of energy router on the optimal operation of distribution network) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (10): 2832-2839.

[ 12 ] 高范强,李子欣,徐飞,等 (Gao Fanqiang, Li Zixin, Xu Fei, et al.). 一种高频链模块化电力电子变压器 (Power electronic transformer based on modular converter with high-frequency link) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (5): 51-58.

[ 13 ] She X. Control and design of a high voltage solid state transformer and its integration with renewable energy resources and microgrid system [D]. Raleigh: North Caro-



lina State University, 2013.

[14] 张璐, 唐巍, 梁军, 等 (Zhang Lu, Tang Wei, Liang Jun, et al.). 基于 VSC 的交直流混合中压配电网功率-电压协调控制 (Power-voltage coordinated control in hybrid AC/DC medium voltage distribution networks based on VSC) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (22): 6067-6075.

[15] Jonnavithula S, Billinton R. Minimum cost analysis of feeder routing in distribution system planning [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11 (4): 1935-1940.

[16] 丛鹏伟, 唐巍, 张璐, 等 (Cong Pengwei, Tang Wei, Zhang Lu, et al.). 基于机会约束规划考虑 DG 与负荷多状态的配电网重构 (Chance-constrained programming based distribution network reconfiguration considering multi-States of distributed generation and load) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2013, 37 (9): 2573-2579.

Coordinating voltage regulation for AC-DC hybrid distribution network with multiple power electronic transformer

LIU Xiang-long<sup>1</sup>, LIU You-bo<sup>1</sup>, ZHANG Chen-yu<sup>2</sup>, CHEN Liang<sup>2</sup>, LIU Jun-yong<sup>1</sup>, LIU Dan<sup>2</sup>  
(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;  
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** The increasing penetration of renewable generation and large implementation of the DC loads are challenges that stress the current distribution systems by causing uncertain voltage variations. AC-DC hybrid distribution network is seen as an innovative solution to address the problem of accommodating highly-dispersed sustainable energy. Specifically, Power Electronic Transformer (PET), which is capable of enhance power quality performance and controllability of power distribution, attracts increasing focuses in this decade as a promising advanced converter. It is of great interest to investigate how to operate the multiple PETs with different modes in a coordinated manner to optimize distribution network performance. This paper formulates the coordinated operation model for multiple PETs to enable fast voltage regulation for hybrid active distribution network equipped with large-scale penetration of inverter-based solar power and DC load. A hybrid optimal power flow (OPF) describing the controlling modes of PETs and operating interaction between AC-DC subsystems is proposed in this paper. The case studies on a modified IEEE 33 AC-DC hybrid power distribution system show that voltage profile can be optimized by using the flexible controlling resource of PETs, facilitating the timely performance adjustment in the presence of fast fluctuating DGs output.

**Key words:** AC/DC hybrid distribution system; distributed generation; operation optimization; power electronic transformer; power-voltage control