

多端柔性交直流配电网接纳电动汽车能力评估方法

张明珂,邱晓燕,孙旭,张志荣,任昊

(四川大学电气工程学院,四川 成都 610065)

摘要:电动汽车的大规模接入将对配电网的安全运行产生重大影响,传统交流配电网对电动汽车的接纳能力有限,而多端柔性交直流配电网由于具有良好的潮流控制能力以及较低的线路损耗,相比于传统交流配电网能够有效提升接纳电动汽车的能力。首先,将马尔科夫链与交通网结合,建立了路网耦合下的电动汽车充电负荷时空分布模型。随后,考虑多端柔性交直流配电网中电压源型换流器(VSC)的潮流控制特性,提出了一种多端柔性交直流配电网接纳电动汽车能力的评估方法。最后,通过算例评估了多端柔性交直流配电网直流网络结构以及VSC控制方式对接纳能力的影响。

关键词:多端柔性;交直流配电网;电动汽车;接纳能力;电压源型换流器控制方法

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd23202

A Method to Evaluate the Capability of Distribution Networks with Multi-terminal VSC Interconnections for Accommodating Electric Vehicle

ZHANG Mingke, QIU Xiaoyan, SUN Xu, ZHANG Zhirong, REN Hao

(College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: The growing electric vehicle (EV) charging load will produce significant impact on safe operation of distribution networks. The accommodation capability of EV charging load in traditional AC distribution networks is limited. AC/DC distribution networks with multi-terminal voltage source converter interconnections have good power flow control ability and low line loss. Compared with traditional AC distribution networks, it can effectively improve the accommodation capability of EV charging. Firstly, combining the Markov chain with the traffic network, the spatial-temporal distribution model of EV charging load under the coupling of road network was established. Then, considering the power flow control characteristics of VSC in AC/DC distribution network, an assessment method for accommodating electric vehicle in AC/DC distribution network was proposed, and a two-layer optimization model for maximizing the accommodation capacity was established. Finally, the influence of AC/DC network structure and VSC control mode on the accommodation capacity was evaluated through an example.

Key words: multi-terminal voltage source converter interconnections; AC/DC distribution network; electric vehicle (EV); accommodation capability; control methods of voltage source converter (VSC)

由于全球变暖和环境污染问题的日益严重,使用电动汽车作为出行工具已经成为减少碳排放的重要手段。近年来,电动汽车在配电网中的渗透率正在迅速提高,而大规模电动汽车的接入将对配电网的正常运行产生重大影响,主要包括配电网损耗增加、电压偏差增大以及线路与变压器过载等问题^[1]。因此,为保证配电网的安全经济运行,促进配电网与电动汽车的协调发展,有

必要对配电网接纳电动汽车的能力进行定量评估。目前,提高配电网接纳电动汽车能力的方案主要有两类:第1类是从调整电动汽车充电负荷的角度出发,制定电动汽车的有序充电策略^[2];第2类是对现有配电网进行升级改造以提高配电网的供电能力。作为未来配电网发展的主要形式之一,多端柔性交直流配电网具有良好的潮流控制能力与较低的线路损耗,并且可以节省电动汽

基金项目:四川省科技厅重点研发项目(2017FZ0103)

作者简介:张明珂(1995—),男,硕士,Email:1053827053@qq.com

车等直流负荷和光伏、风电等分布式电源(distributed generator, DG)接入电网的交流环节^[3]。随着分布式能源以及直流负荷渗透率的不断提高,交直流配电网可以有效提高对电动汽车的接纳能力。分析多端柔性交直流配电网对电动汽车的接纳能力、探索制约接纳能力提升的主要因素,对电动汽车充电设施规划以及交直流配电网的升级改造均具有重要的参考价值。

配电网接纳电动汽车的能力是指在考虑配电网主动调整措施下,满足安全运行约束条件时配电网所能承受同时充电的电动汽车的最大数量。在传统交流配电网接纳电动汽车能力评估方面,文献[4]从安全性、可靠性和经济性三方面对配电网接纳电动汽车的能力进行评估,使用层次分析法从指标层、准则层、目标层3个层次建立了接纳能力的评估体系;文献[5]按照负荷特点将居民区进行划分,以居民区变压器不过载为约束条件,评估了在不同电动汽车渗透率水平下居民区配电变压器接纳电动汽车充电的能力;文献[6]在评估配电网接纳能力时考虑了电动汽车充电对配电网可靠性的影响,提出了可靠性灵敏度指标和最优保有量指标,求解了配电网可接纳电动汽车充电的最大规模;文献[7]在评估配电网接纳电动汽车能力时加入了用户排队充电时间指标,计算了在有顺序充电启动机制下不同充电负荷接入方式对配电网接纳能力的影响。

目前对于多端柔性交直流配电网接纳电动汽车能力评估的研究相对较少,文献[8]对含有分布式电源的纯直流网络供电能力进行了评估;文献[9]建立了交直流混合配电网供电能力的评估模型,设定了不同的负荷增长模型,对交直流配电网的结构和设备容量进行了优选;文献[10]对交直流配电网中柔性互联装置进行分析,研究了不同交直流分区间的功率交换情况,证明交直流网络之间的电压源型换流器(voltage source converter, VSC)可以对负载率过高的分区进行电压支撑和有功功率支援。在多端柔性交直流配电网中,由于VSC具有良好的潮流控制能力,可以有效解决配电网约束条件越限的问题^[11],因此对多端柔性交直流配电网的接纳能力进行评估时必须充分考虑VSC的潮流调控特性。

本文提出了一种多端柔性交直流配电网接纳电动汽车能力的评估方法,设定了纯交流网络以及不同直流网络结构和VSC控制方式的多端

柔性交直流配电网接纳电动汽车充电的多个场景,并对这些场景下配电网的接纳能力进行了对比,评估了直流网络结构以及VSC控制方式对接纳能力的影响。

1 路网耦合下电动汽车充电负荷建模

电动汽车接入电网所产生的影响主要通过充电负荷来集中反映,因此电动汽车充电负荷模型是研究配电网接纳电动汽车能力的基础。目前电动汽车充电负荷的建模方法主要有:考虑电动汽车出行规律的统计学建模方法^[12]、基于马尔科夫转移概率矩阵的出行链方法^[13]等。为了更好地模拟电动汽车的实际出行规律,电动汽车充电负荷的建模需要考虑交通网的影响^[14],使用一种交通网约束下基于马尔科夫概率转移矩阵的充电负荷建模方法。首先,建立电动汽车的充电模型以及道路交通模型,根据由马尔科夫空间转移概率矩阵随机抽样得到出行目的地区域,并由各路网节点的转移概率抽样得到本次出行目的地所在的路网节点,按最短路径法生成电动汽车的行驶路径,结合对应路段的参数确定车辆行驶参数。然后结合电动汽车电量信息以及各区域停车时长的统计规律确定出行过程中的充电规律,进而生成一日内的马尔科夫出行链,最后根据路网耦合关系将电动汽车充电负荷归算至对应的配电网节点。重复以上过程即可得到多辆电动汽车的充电负荷的时空分布模型。单辆电动汽车充电负荷建模流程如图1所示。

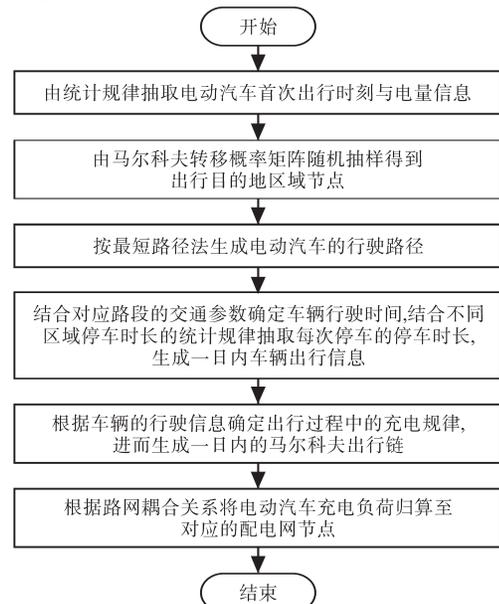


图1 EV充电负荷时空分布模型

Fig.1 Spatiotemporal distribution model of EV charging load

2 多端柔性交直流配电网接纳电动汽车能力评估

2.1 目标函数

为了充分发挥多端柔性交直流配电网的优势,将目标函数设置为满足配电网安全运行约束前提下,考虑VSC调控等交直流配电网优化调整措施,配电网所允许接入的同时充电的电动汽车最大辆数:

$$\max_{v \in V} \max \mathbf{e}^T \mathbf{n}_{EV} \quad (1)$$

式中: \mathbf{n}_{EV} 为由各节点接入的电动汽车数量组成的向量; \mathbf{e}^T 为单位向量; v 为VSC优化调整措施; V 为 v 的可行集。

2.2 交直流配电网VSC参数优化调整

1)交直流网络潮流约束如下:

$$P_{i,s} = U_{i,s} U_{j,s} (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad i \in \phi_s \quad (2)$$

$$Q_{i,s} = U_{i,s} U_{j,s} (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad i \in \phi_s \quad (3)$$

$$P_{i,d} = U_{i,d} \sum_{j=1}^n Y_{j,d} (U_{i,d} - U_{j,d}) \quad i \in \phi_d \quad (4)$$

式中: $P_{i,s}$, $Q_{i,s}$ 分别为交流网络中节点 i 注入的有功、无功功率; G_{ij} , B_{ij} 分别为交流支路的电导、电纳; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 的相角差; $P_{i,d}$ 为直流节点注入的有功功率; $Y_{j,d}$ 为直流网络的节点导纳矩阵元素; $U_{i,d}$, $U_{j,d}$ 分别为直流节点 i 、直流节点 j 的节点电压。

2)线路容量约束如下:

$$P_{i,d} \leq P_{i,d}^{\max} \quad i \in \phi_d \quad (5)$$

$$S_{i,s} \leq S_{i,s}^{\max} \quad i \in \phi_s \quad (6)$$

式中: $P_{i,d}^{\max}$, $S_{i,s}^{\max}$ 分别为直流线路和交流线路的载流量上限。

3)VSC载流量约束如下:

$$S_{V_i} \leq S_{V_i}^{\max} \quad V_i \in \phi_{vsc} \quad (7)$$

式中: $S_{V_i}^{\max}$ 为VSC的最大容量。

4)交直流电压约束如下:

$$U_{s,\min} \leq U_{s,i} \leq U_{s,\max} \quad i \in \phi_s \quad (8)$$

$$U_{d,\min} \leq U_{d,i} \leq U_{d,\max} \quad i \in \phi_d \quad (9)$$

式中: $U_{s,\max}$, $U_{s,\min}$, $U_{d,\max}$, $U_{d,\min}$ 分别为交流节点和直流节点的电压上、下限。

2.3 交直流配电网VSC参数优化调整

VSC可以控制直流侧电压 U_d 、交流侧电压 U_s 、交流侧有功功率 P_s 、交流侧无功功率 Q_s 中的任意两个量,单台VSC一般可采用的控制方式有定 P_s 、定 Q_s 控制;定 U_d 、定 Q_d 控制; U_d - P_d 下垂、定 Q_s 控制等。多端柔性交直流配电网还需要考

虑VSC之间控制方式的配合,设置主从控制和电压下垂控制两种典型的VSC换流站控制方式,主从控制的主站设置为定 U_d 、定 Q_s 控制,用于维持直流网络的电压水平,其他站设置为定 U_d 、定 Q_s 控制。电压下垂控制设置一个换流站为 U_d - P_d 下垂、定 Q_s 控制,其他换流站设置为定 P_s 、定 Q_s 控制。

目标函数设置为节点电压、交直流支路容量、换流站载流量的越限程度之和最小,即

$$\min(g) = f_U + f_I + f_{P,vsc} + f_{Q,vsc} \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} f_U = w_1 \sum_{i=1}^N \Delta U_i \\ \Delta U_i = \begin{cases} U_i - U_{i,\max} & U_i > U_{i,\max} \\ 0 & U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \\ U_i - U_{i,\min} & U_{i,\min} < U_i \end{cases} \\ f_I = w_2 \sum_{i=1}^N \Delta S_i \\ \Delta S_i = \begin{cases} S_i - S_{i,\max} & S_i > S_{i,\max} \\ 0 & S_i \leq S_{i,\max} \end{cases} \\ f_{P,vsc} = w_3 \sum_{i=1}^M \Delta P_{i,vsc} \\ \Delta P_{i,vsc} = \begin{cases} P_{i,vsc} - P_{i,\max} & P_{i,vsc} > P_{i,\max} \\ 0 & P_{i,vsc} \leq P_{i,\max} \end{cases} \\ f_{Q,vsc} = w_4 \sum_{i=1}^M \Delta Q_{i,vsc} \\ \Delta Q_{i,vsc} = \begin{cases} Q_{i,vsc} - Q_{i,\max} & Q_{i,vsc} > Q_{i,\max} \\ 0 & Q_{i,vsc} \leq Q_{i,\max} \end{cases} \end{cases}$$

式中: ΔU_i , ΔS_i , $\Delta P_{i,vsc}$, $\Delta Q_{i,vsc}$ 分别为节点电压、支路容量、换流站的有功、无功功率的越限量; f_U , f_I , $f_{P,vsc}$, $f_{Q,vsc}$ 分别为 ΔU_i , ΔS_i , $\Delta P_{i,vsc}$, $\Delta Q_{i,vsc}$ 的惩罚函数; w_1 , w_2 , w_3 , w_4 分别为各自对应的惩罚系数。

采用自适应遗传算法对所提出的VSC参数优化问题进行求解,相比于传统遗传算法具有更快的收敛速度。

2.4 模型求解

按照所建立的电动汽车充电负荷模型,由快到慢逐步增加电动汽车规模,按照多端柔性交直流配电网潮流计算方法进行潮流计算^[15],并检验安全运行约束条件是否越限,若某一安全运行约束条件越限,求解出当前VSC控制方式及控制参数下交直流配电网接纳电动汽车的最大数量,然后针对安全运行条件越限的情况,优化VSC控制参数,解决达到最大接纳数量时约束条件越限的问题,反复迭代即可求解所提模型。模型求解流

程如图2所示,步骤如下:

1) 设定电动汽车初始规模、VSC控制方式与初始参数以及24 h基础负荷数据;

2) 计算初始规模电动汽车在时段1的充电负荷,检查是否满足运行安全约束条件,如果不满足某个条件,则进入下一步,若满足条件,则按照自适应方法由快到慢增加电动汽车的规模,直至配电网运行参数越限;

3) 对VSC参数进行优化调整,若调整后配电网重新满足安全运行约束条件,可继续接纳电动汽车充电负荷,返回步骤2);若VSC参数调整后配电网仍然不满足安全运行的约束条件,输出此时电动汽车的数量,即为该时段可接纳的电动汽车最大数目,进入下一步;

4) 时段数加1,返回步骤2),直至计算出一天内每个时段可接纳的电动汽车最大数量,其中的最小值 $n_{EV} = \min \{n_{EV1}, n_{EV2}, \dots, n_{EV24}\}$,即为配电网可接纳电动汽车的最大数量。

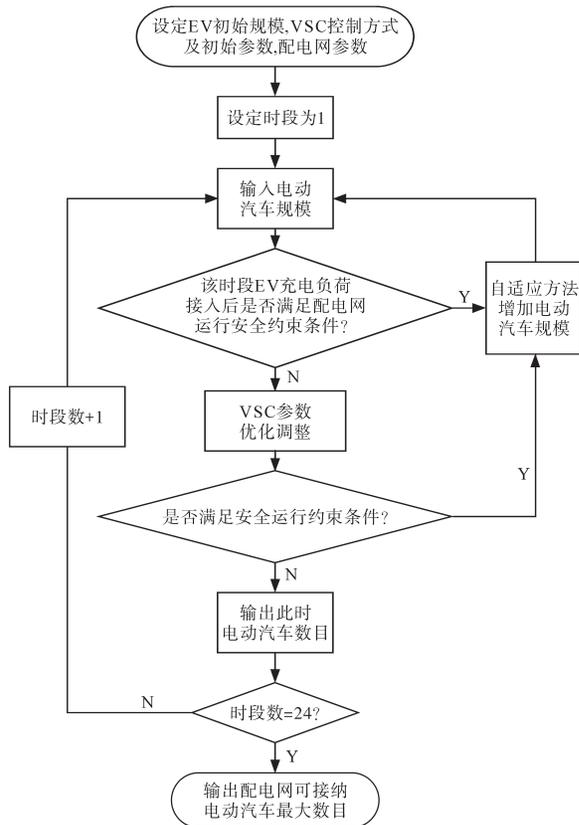


图2 模型求解流程

Fig.2 Model solution process

3 算例分析

以某城市交通网为例进行电动汽车充电负荷建模,交通网和IEEE33节点配电网耦合关系

如图3所示,其中1~29为交通网节点,(1)~(29)为配电网节点。将区域划分为居民区(节点1~16)、工作区(节点17~20)和商业区(节点21~29)三部分,1 d内各时段各区域的停车时长统计规律、目的转移概率矩阵以及道路参数采用文献[13-14]所列统计数据。

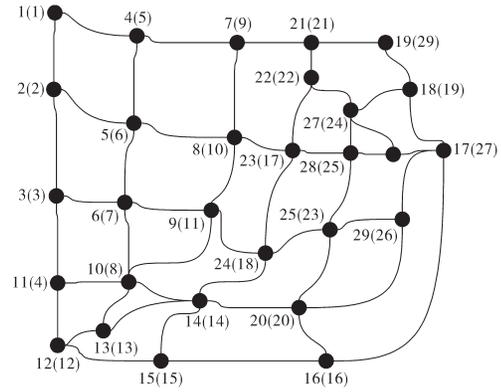


图3 交通网和IEEE33节点配电网耦合关系示意图

Fig.3 Schematic diagram of coupling relationship between transportation network and IEEE33 node distribution network

在IEEE33节点交流配电网的基础上进行改造^[16],得到含三端VSC直流配电网的交直流配电网,如图4所示。图中,节点8~18为直流节点,其余节点为交流节点;节点8与节点18之间存在一条直联络线,用于构造不同结构的直流网络;节点11、节点18、节点20接入3组光伏发电;节点7、节点31接入两组风力发电机。VSC额定容量为 $2 \text{ MV}\cdot\text{A}$,两种VSC控制方式设置如表1所示。

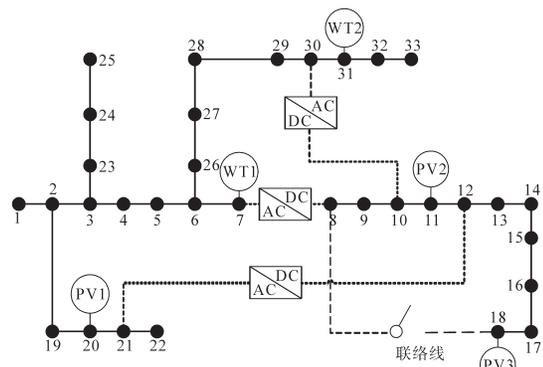


图4 IEEE33节点多端柔性交直流配电网结构图

Fig.4 IEEE33 flexible AC/DC distribution network structure diagram

表1 VSC控制方式

Tab.1 VSC control mode

控制方式	VSC1	VSC2	VSC3
单点电压控制	定 U_d 、定 Q_s	定 P_s 、定 Q_s	定 P_s 、定 Q_s
电压下垂控制	U_d - P_d 下垂、定 Q_s	定 P_s 、定 Q_s	定 P_s 、定 Q_s

分布式电源渗透率设为10%,电压下垂控制下垂系数设为0.04,设定以下5种情景:

情景1:配电网为纯交流配电网。

情景2:配电网为交直流配电网,直流网络结构为链式,即直流畅络线开关断开,VSC控制方式为单点电压控制。

情景3:配电网为交直流配电网,直流网络结构为环式,即直流畅络线开关闭合,VSC控制方式为单点电压控制。

情景4:配电网为交直流配电网,直流网络结构为链式,VSC控制方式为电压下垂控制。

情景5:配电网为交直流配电网,直流网络结构为环式,VSC控制方式为电压下垂控制。

5种情景配电网电动汽车接纳能力计算结果如表2所示,相应的VSC控制参数如表3所示。

表2 各情景下配电网接纳电动汽车能力

情景	接纳EV能力/辆	越限时段	制约因素
情景1	435	21:00	节点18电压越限
情景2	1 720	22:00	节点18电压越限
情景3	2 170	21:00	节点33电压越限
情景4	1 830	22:00	节点18电压越限
情景5	2 480	21:00	节点33电压越限

表3 各情景下VSC控制参数

	U_d	Q_s	P_s	U_{dref}	P_{dref}
情景1	VSC1	1.05	-0.34		
情景2	VSC2		0.14	1.99	
	VSC3		-1.82	0.83	
	VSC1	1.05	-0.64		
情景3	VSC2		0.01	1.99	
	VSC3		-0.02	1.99	
	VSC1		0.56		1.04
情景4	VSC2		-0.31	1.67	
	VSC3		1.84	-0.04	
	VSC1		-0.62		1.04
情景5	VSC2		0.09	1.99	
	VSC3		-1.21	-0.73	

将情景1与情景2~5进行对比,可以发现,采用不同VSC运行方式与直流部分网络结构的交直流配电网接纳能力均优于纯交流配电网。对比情景2和情景3,情景4和情景5,可以发现直流网络采用环形结构的交直流配电网相比采用链式的接纳能力更强。对比情景2和情景4,情景3和情景5,可以发现VSC采用下垂控制的交直流配电网比VSC采用单点电压控制的交直流

配电网接纳能力更强。因此,直流网络环式运行或者VSC采用电压下垂控制均有利于提高交直流配电网接纳电动汽车的能力。

5种情景下接纳能力达到上限均是由于配电网某些节点的电压不满足电压安全约束条件,可见电压越限是制约配电网接纳电动汽车能力的主要因素。5种情景电压分布情况如图5所示,由图可见,纯交流配电网整体电压水平最低,节点电压从配电网首端到末端逐渐降低,这是因为辐射性交流配电网不同支路之间缺乏功率流动途径,电压水平较高的支路无法对电压水平较低的支路形成功率支援,而多端柔性交直流配电网由于可以通过VSC控制支路间的功率流动,具有更好的潮流控制能力。由图可见,直流网络采用环式结构或者VSC控制方式采用电压下垂控制有利于提高交直流配电网整体的电压水平。

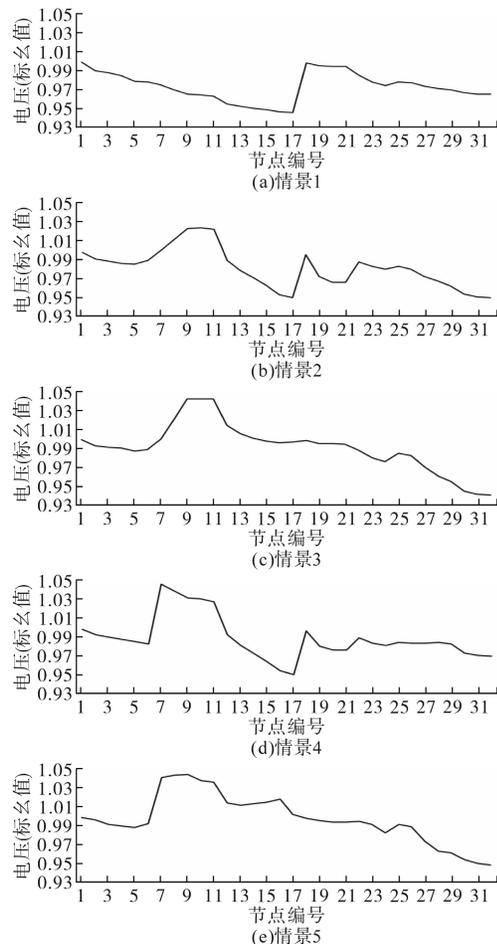


图5 各情景下节点电压分布情况

Fig.5 Node voltage distribution under various situation

各情景下VSC上功率传输情况如表4所示。由表4可见,当交流侧电压水平过低时,VSC会向交流侧注入容性无功功率,提高对应交流侧的电压水平,当交流侧电压水平过高时,VSC会向交

流侧注入感性无功功率降低电压水平,具有良好的无功调节功能,同样的,定PQ控制的VSC可以通过调节注入直流网络的有功功率对直流配电网的电压水平进行调整,例如情景5表示直流网络在电压下垂控制时某些节点电压会偏高,需要通过VSC3向交流部分发出有功功率来降低自身电压水平,这种功率调节能力是多端柔性交直流配电网相比传统交流配电网的优势之一。

表4 各情景下VSC功率传输情况

Tab.4 Power transmission of VSC in each scenario

		P_s (标么值)	Q_s (标么值)
情景2	VSC1	-1.11	-0.34
	VSC2	1.99	0.14
	VSC3	0.83	-1.81
情景3	VSC1	-1.25	-0.63
	VSC2	1.99	0.01
	VSC3	1.99	-0.02
情景4	VSC1	0.72	0.56
	VSC2	1.67	-0.3
	VSC3	-0.04	-1.84
情景5	VSC1	-1.34	-0.37
	VSC2	1.99	0.09
	VSC3	-0.73	-1.21

4 结论

多端柔性交直流配电网可以使用VSC控制技术对潮流进行灵活控制,因此在评估交直流配电网接纳电动汽车能力时必须充分考虑VSC的潮流调控特性。首先在交通网约束下对电动汽车充电负荷进行建模,然后对多端柔性交直流配电网接纳电动汽车能力的评估方法进行了研究,算例分析结果显示:

1)相比于传统交流配电网,考虑VSC潮流调控特性的多端柔性交直流配电网能够有效提升对电动汽车的接纳能力。

2)多端柔性交直流配电网的直流网络采用环式结构运行或者VSC采用电压下垂控制均有利于提高交直流配电网接纳电动汽车的能力。

3)制约配电网接纳电动汽车能力的主要原因是节点电压越限,这与电动汽车充电负荷时空分布的不均衡性有关,交直流配电网中直流网络采用环式结构运行或者VSC采用电压下垂控制方式可以有效提高配电网整体的电压水平。

参考文献

[1] 杨羊,马玉秋.电动汽车智能充电系统控制策略研究[J].电

气传动,2019,49(12):64-70.

Yang Y, Ma Y Q. Research on control strategy of electric vehicle intelligent charging system[J]. Electric Drive, 2019, 49(12): 64-70.

[2] Zhao J, Wang J, Zhao X, et al. Distribution network electric vehicle hosting capacity maximization: a chargeable region optimization model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5):4119-4130.

[3] 曾嵘,赵宇明,赵彪,等.直流配用电关键技术研究与应用展望[J].中国电机工程学报,2018,38(23):6791-6801,7114.

Zeng R, Zhao Y M, Zhao B, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6791-6801, 7114.

[4] 田梦瑶,汤波,杨秀,等.综合考虑充电需求和配电网接纳能力的电动汽车充电站规划[J].电网技术,2021,45(2):498-509.

Tian M Y, Tang B, Yang X, et al. Planning of electric vehicle charging stations considering charging demands and acceptance capacity of distribution network[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 498-509.

[5] 郭毅,胡泽春,张洪财,等.居民区配电网接纳电动汽车充电能力的统计评估方法[J].电网技术,2015,39(9):2458-2464.

Guo Y, Hu Z C, Zhang H C, et al. A statistical method to evaluate the capability of residential distribution network for accommodating electric vehicle charging load[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2458-2464.

[6] 左琦,贺海磊,梁才浩,等.计及有序充电的电动汽车接纳能力量化评估方法[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(6):1-6.

Zuo Q, He H L, Liang C H, et al. Quantitative evaluation method of system acceptance capacity of electric vehicles in ordered charging mode[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2017, 29(6): 1-6.

[7] 杨景旭,张勇军.基于有序充电启动机制和补贴机制的充电负荷接纳能力优化[J].电力自动化设备,2020,40(11):122-130.

Yang J Y, Zhang Y J. Optimization of charging load acceptance capacity based on ordered charging start-up mechanism and subsidy mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 122-130.

[8] 叶莘,韦钢,马雷鹏,等.含分布式电源的直流配电网供电能力评估[J].电力系统自动化,2017,41(9):58-64.

Ye S, Wei G, Ma L P, et al. Power supply capability evaluation of DC distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 58-64.

[9] 张释中,裴玮,杨艳红,等.交直流混合配电网结构优选和设备容量优化[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2766-2777. Zhang S Z, Pei W, Yang Y H, et al. Optimization of AC/DC hybrid distribution network structure and equipment capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2766-2777.

[10] Liu S, Miao M, Li T, et al. Optimal power flow in hybrid AC/DC

