

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.05.004

考虑规模化电动汽车负荷的柔性台区安全经济运行边界

谭瑾¹, 王勇¹, 马洲俊¹, 王子成¹, 徐广开², 孙国强²

(1. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210019;

2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要:柔性台区将若干个传统交流台区通过柔性装置互联,能够充分利用各台区变压器的容量,提升对电动汽车的接纳能力。文中首先针对柔性台区建立了一维安全经济运行边界模型,并提出采用安全裕度百分数作为度量机制,为调度人员提供直观的系统运行状态和安全裕度,实现主动调度。进一步地,基于凸包络构建柔性台区的二维安全经济运行域模型,方便调度人员对多个充电站进行协同管理。仿真结果表明,安全经济运行边界能够同时计及系统的安全性和经济性,可拓展性强;经济指标对安全经济边界的形态有较大影响;柔性台区中的直流充电桩和交流充电桩的安全经济运行边界具有不同的形态;基于凸包络的二维安全经济运行域模型能够有效反映系统运行状态的安全性和经济性。

关键词:台区低压互联;电动汽车快充负荷;安全运行边界;经济运行边界;交直流配电网;凸包络

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)05-0025-09

0 引言

近年来,电动汽车凭借其环保、无污染的优势被广泛推广运用,大规模电动汽车充电负荷的接入给电网带来了新的挑战^[1-2]。在传统的慢充模式下,电动汽车充电负荷与居民用电的高峰期重叠,容易造成电网元件过载、电压波动、线路损耗增加、配电网三相不平衡程度加剧等问题;在快充模式下,电动汽车接入的随机性、快充桩的聚合效应对电网的强冲击以及当前配变容量的限制,均会影响配电网在快充模式下的安全经济运行^[3-5]。

为了减小上述电动汽车充电对电网的影响,国内外学者提出了多种调度方案,以直接控制^[6-8]和价格激励^[9-12]的形式实现对电动汽车充电的有序调度,并结合对电网元件的快速调控(如投切电容器、调节变压器变比等),确保电网的安全经济运行。上述方案均是基于传统交流台区来研究减小电动汽车充电带来负面影响的方法,而传统交流台区均是独立运行的,对电动汽车充电负荷的接纳能力受到各自变压器容量的限制,无法实现对变压器容量的充分利用。相比于交流配电系统,直流配电系统具有电能损耗低、电能质量高、供电容量大、供电可靠性强以及易接纳分布式电源等优势^[13-17]。为此,文献[18-20]提出了柔性台区的概念,基于电力电子技术,将若干交流台区通过电压源型换流器(voltage source converter, VSC)互联,实现多台区

协同运行与控制,充分利用各台区的变压器容量,减小了规模化电动汽车接入给电网带来的负面影响。

为了确保柔性台区的安全经济运行,可以从两方面入手:一方面是根据实时接入的电动汽车充电负荷以及居民用电负荷,按照某一目标对台区负荷进行转供,在确保台区安全运行的前提下实现经济效益最大化^[18,20];另一方面,利用价格机制可以实现对电动汽车充电负荷的“去刚性化”^[21-22],具体而言,调度人员可以按照既定的经济标准(如运行成本上限)控制电动汽车的接入量,保证台区运行的安全性和经济性。针对后者,文中借鉴“运行域”的概念^[23-24],提出了柔性台区一维安全经济运行边界模型和二维安全经济运行域模型,旨在为调度人员提供各充电桩在满足一定经济安全约束下的最大可接入负荷。调度人员可以参考安全经济边界对电动汽车充电负荷实行弹性调度,调整各台区的电动汽车接入量,从源头上预防台区的高风险、高成本运行。

1 柔性台区的结构

1.1 传统配电台区

电动汽车的传统接入方式如图1所示,各个交流台区独立承担相应区域的电动汽车充电负荷。这种接入方式存在以下不足:(1)大规模电动汽车日内充放电特性会加大负荷的峰谷差,降低变压器有效利用率。(2)由于短路容量的限制,交流配电网不同台区开环运行,各个台区的最大可接入负荷

收稿日期:2021-04-13;修回日期:2021-06-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1966205)

会受到台区变压器容量的限制。当电动汽车大规模接入时,只能通过成本较高的变压器扩容来满足负荷增长需求。(3) 当电动汽车在负荷高峰期时段大规模接入时,单台变压器会面临长时间过载运行的风险,不利于台区的安全经济运行。(4) 当某台区变压器发生 $N-1$ 故障时,该台区内的负荷无法实现负荷转供,将面临切负荷的风险,造成供电可靠性下降。

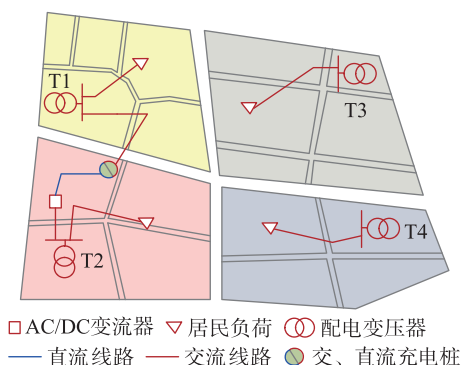


图1 电动汽车接入传统配电台区

Fig.1 EVs plug into the traditional distribution districts

1.2 柔性配电台区

柔性台区基于电力电子技术,将若干交流台区通过 VSC 互联,实现多台区的协同运行与控制。柔性台区的拓扑结构如图 2 所示。该柔性台区有 2 个主要形态特征:(1) 直流支路具有潮流多方向连续调控能力,从而使台区具有潮流柔性调控能力,能更快地适应充电负荷的波动,使台区处于安全运行边界内;(2) 这种连接模式不增加台区间的短路电流,对现有台区供电系统的适应性具有柔性。

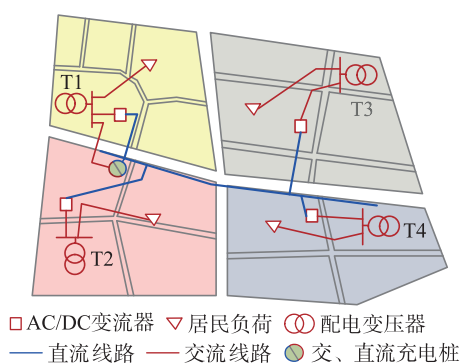


图2 电动汽车接入柔性配电台区

Fig.2 EVs plug into the flexible distribution districts

基于上述特征,柔性台区可以实现以下目标:(1) 负荷优化转供和均衡调配,充分利用变压器容量和各台区负荷的时空互补性,避免单台变压器重载或超载,延缓变压器扩容,降低建设成本;(2) 各台区通过负荷转供实现对故障台区负荷的紧急支撑,减少切负荷量,提高柔性台区的供电可靠性。

2 柔性台区一维安全经济运行边界

柔性台区的一维安全经济运行边界是指台区内特定节点在满足某一安全经济条件下的最大、最小注入功率。文中选取台区内的充电桩为研究对象,在考虑负荷优化转供和均衡调配的前提下,计算各时段内充电桩所能接入的最大充电负荷,获取台区的安全经济运行边界。在计算某充电桩的最大、最小接入负荷时,保持其余充电桩的接入负荷不变^[23-25]。此外,文中设定的调度周期(1 h)通常长于快充的平均充电时长(30 min),因此,对于准许接入的充电负荷,假设其充电需求可以完全满足。求取柔性台区一维安全经济运行边界的具体模型如式(1)一式(11)所示。式(1)为柔性台区安全经济边界模型的目标函数,式(2)为变压器的运行损耗成本,式(3)一式(5)为运行损耗成本的具体计算方法,式(6)为 VSC 运行成本,式(7)对台区运行成本施加上限约束,式(8)为交流侧的功率平衡方程,式(9)对变压器负载率施加上限约束,式(10)为 VSC 运行约束,式(11)为直流侧的功率平衡方程。

$$\begin{cases} \max P_{i,t}^{\text{ac}} \\ \max P_{i,t}^{\text{dc}} \end{cases} \quad (1)$$

$$C_{\text{tr}} = C_{\text{fe}} + C_{\text{cu}} \quad (2)$$

$$C_{\text{fe}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n c_t^{\text{cost}} L_i^{\text{fe}} \quad (3)$$

$$C_{\text{cu}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n c_t^{\text{cost}} L_i^{\text{cu}} \beta_{i,t}^2 \quad (4)$$

$$\beta_{i,t} = P_{i,t}^{\text{tr}} / C_i^{\text{ca}} \quad (5)$$

$$C_{\text{vsc}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n c_t^{\text{cost}} |P_{i,t}^{\text{vsc}}| (1 - \eta_{\text{vsc}}) \quad (6)$$

$$C_{\text{tr}} + C_{\text{vsc}} \leq \omega \quad (7)$$

$$P_{i,t}^{\text{tr}} = P_{i,t}^{\text{city}} + P_{i,t}^{\text{ac}} + P_{i,t}^{\text{vsc}} \quad (8)$$

$$\beta_{i,t} \leq \beta_{\text{max}} \quad (9)$$

$$-P_i^{\text{vsc,max}} \leq P_{i,t}^{\text{vsc}} \leq P_i^{\text{vsc,max}} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n P_{i,t}^{\text{vsc}} = P_{i,t}^{\text{dc}} + P_{i,t}^{\text{ess}} \quad (11)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{ac}}$, $P_{i,t}^{\text{dc}}$ 分别为 t 时刻的电动汽车交流负荷和直流负荷; C_{tr} 为变压器运行的总损耗成本; C_{fe} 为铁耗成本; C_{cu} 为铜耗成本; c_t^{cost} 为电网分时电价; L_i^{fe} , L_i^{cu} 分别为变压器的运行铁耗和额定铜耗; $\beta_{i,t}$, $P_{i,t}^{\text{tr}}$ 分别为变压器 t 时刻的负载率和功率; C_i^{ca} 为第 i 个变压器的容量; C_{vsc} 为 VSC 运行成本; η_{vsc} 为变流器的转换效率; $P_{i,t}^{\text{vsc}}$ 为 t 时刻流经第 i 个 VSC 的功率 ($P_{i,t}^{\text{vsc}} > 0$ 表示 VSC 处于整流状态,功率从变压器流向直流母线; $P_{i,t}^{\text{vsc}} < 0$ 表示 VSC 处于逆变状态,功率

从直流母线流向变压器); ω 为柔性台区的经济运行指标,可以由调度人员预先指定; $P_{i,t}^{\text{city}}$ 为居民负荷功率; β_{\max} 为变压器负载率的最大值,可以由调度人员预先指定; $P_i^{\text{vsc,max}}$ 为第 i 个台区变流器的功率最大值; $P_{i,t}^{\text{ess}}$ 为 t 时刻的储能功率。

式(1)一式(11)为线性模型,现有的商业求解软件能够高效准确地获得全局最优解,为安全经济运行边界的实时构建提供了可能。

3 柔性台区安全经济运行度量指标

基于第2章所得安全经济运行边界,定义“安全裕度百分数”指导调度人员的操作,方便调度人员更加直观地判断当前运行状态的安全性,确保柔性台区的安全经济运行。安全裕度百分数是指当前运行点与运行边界点之间的功率差值与运行边界点功率的比值,交流充电桩和直流充电桩的安全裕度百分数定义如下:

$$S_{i,t}^{\text{ac}} = \frac{P_{i,t}^{\text{ac}*} - P_{i,t}^{\text{ac}}}{P_{i,t}^{\text{ac}*}} \times 100\% \quad (12)$$

$$S_{i,t}^{\text{dc}} = \frac{P_{i,t}^{\text{dc}*} - P_{i,t}^{\text{dc}}}{P_{i,t}^{\text{dc}*}} \times 100\% \quad (13)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{ac}*}$, $P_{i,t}^{\text{dc}*}$ 分别为充电站在 t 时刻允许接入的最大交流、直流充电负荷; $P_{i,t}^{\text{ac}}$, $P_{i,t}^{\text{dc}}$ 分别为充电站在 t 时刻实际接入的交流、直流充电负荷。上述安全距离可以指示当前负荷状态下相应充电站的安全裕度以及对电动汽车不确定性接入的应对能力。具体而言,当实际接入值较接近最大允许接入值(即安全距离较小,安全裕度较低)时,若对充电站中的电动汽车充电管理不当(例如,用户未经管理员许可而私自接入充电),或者管理人员对其余台区的负载状态预测有误,则容易造成运行点位于安全经济边界之外,导致台区运行成本超标或过载运行。

4 柔性台区二维安全经济运行域

4.1 二维安全经济运行域的基本定义

柔性台区的二维安全经济运行边界是指对于台区内特定两节点的注入功率所构成的运行点,在满足某一安全经济条件下该运行点的可达范围。这里选取台区内的交流充电桩和直流充电桩为研究对象,在考虑负荷优化转供和均衡调配的前提下,计算各时段内2类充电桩所能接入的最大/最小充电负荷,获取台区的二维安全经济运行边界。在计算2类充电桩的最大/最小接入负荷时,保持台区内其余对象(比如居民负荷)的接入负荷不变。二

维安全经济运行边界所围城的区域即为柔性台区二维安全经济运行域,位于运行域内的运行点均满足柔性台区的安全经济约束,位于运行域外的运行点均不满足柔性台区的安全经济约束,即可能出现安全指标超限或经济指标超限。

4.2 柔性台区二维安全经济运行边界点

记决策空间 $y = (P_{i,t}^{\text{ac}}, P_{i,t}^{\text{dc}})$, 根据式(1)一式(11)的求解结果,可以获得相应充电站在各时刻的最大、最小可接入负荷,即 $[y, \underline{y}]$ 。进一步地,取 $y_l = y_{l,c}$, 其中 $y_{l,c} \in [y, \underline{y}]$, 求解以下优化问题,获取决策变量 y_v 的最大、最小值:

$$\begin{cases} \max y_v \\ \text{s.t. 式(2)一式(11)} \\ y_l = y_{l,c} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \min y_v \\ \text{s.t. 式(2)一式(11)} \\ y_l = y_{l,c} \end{cases} \quad (15)$$

式中: l, v 为决策空间 y 的索引; c 为指定值的索引。由以上优化问题可以得到每一个给定 $y_{l,c}$ 下的变量 y_v 的上、下限。通过改变索引 c 以及决策变量 l 和 v , 便可以得到一系列安全经济边界点。值得注意的是,决策变量同样可以取多个对象,从而得到多维安全经济边界点。

4.3 基于凸包络的柔性台区二维安全经济运行域

凸包络是指覆盖所有给定运行点的最小凸集。基于一系列安全经济运行边界点,采用如图3所示的凸包络法(分段线性)构造安全经济运行域。

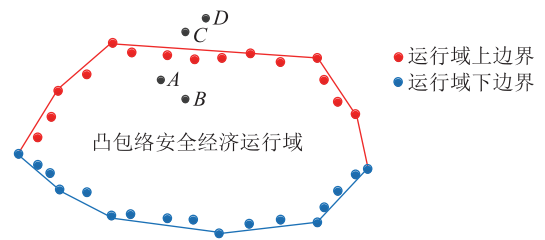


图3 基于凸包络的安全经济运行域

Fig.3 Convex hull based security-economy operational region

假定安全经济运行域边界运行点为集合 Y , 则凸包络安全域的数学模型为:

$$\Phi(Y) = \left\{ z = \sum_{i=1}^{k_z} (\delta_i z_i) \mid z_i \in Y, \delta_i \geq 0, \sum_{i=1}^{k_z} \delta_i = 1 \right\} \quad (16)$$

式中: k_z 为安全域边界点为凸包络顶点个数。显然,式(16)描述的安全域由多个线性不等式构成。基于 Quickhull 算法, Matlab 提供的 convhulln 函数

可以快速构造任一维度的凸包络。

同时,基于凸包络形式的安全域,通过判断当前运行点是否在安全域内,可以实现对柔性台区的快速定量安全经济评估。举例而言,图3中域内点A与点B为安全经济运行点,而域外点C与点D为不安全或不经济运行点。点A距离安全域边界更近,因而点A的安全经济裕度小于点B;同理,点C的不安全或不经济程度小于点D。

5 算例测试

5.1 算例拓扑结构及参数设置

柔性台区的拓扑结构如图4所示。4个交流台区(T1—T4)各自通过4台VSC实现直流侧的互联,直流、交流充电站分别接入直流母线和交流T1台区。直流充电站内包括3台120 kW的直流充电桩,交流充电站内包括3台60 kW的交流充电桩。VSC的功率上限为120 kV·A,工作效率为98.5%。

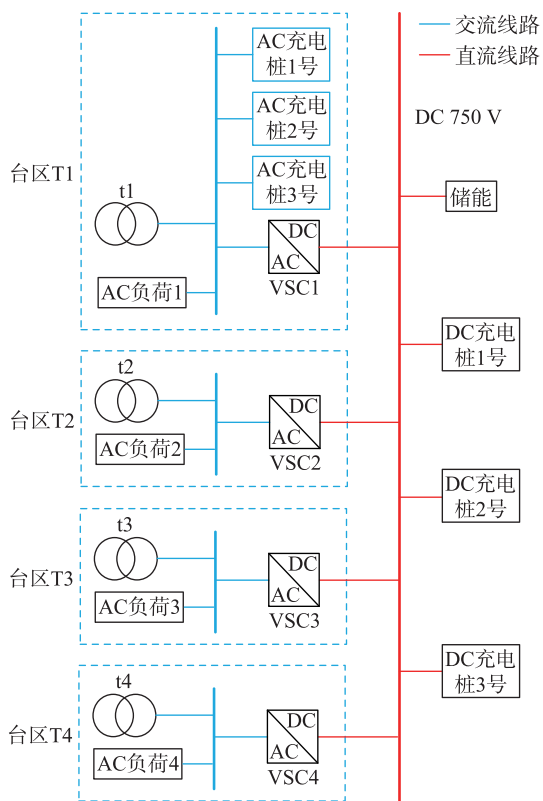


图4 柔性台区示范工程的拓扑结构
Fig.4 Structure of flexible district in the demonstration project

各台区变压器的相关参数如表1所示,电网分时电价如表2所示。电动汽车充电负荷曲线和居民负荷曲线分别如图5和图6所示。储能装置的容量为80 kW·h,充放电功率上限为120 kW。文中假设各时段内储能装置均处于满电量状态,进而获取柔性台区在各时段的最大可达运行边界。在实际运

行时,调度人员需要结合储能装置的实际余量来求取安全经济运行边界。安全边界模型采用通用代数建模软件(GAMS)中的CPLEX进行求解。

表1 变压器参数设置

Table 1 Transformer parameter settings

参数	t1	t2	t3	t4
容量/(kV·A)	630	630	800	800
额定铁损 L_{fe} /kW	1.2	1.2	1.4	1.4
额定铜损 L_{cu} /kW	6.2	6.2	7.5	7.5
负载率约束 β_{max} /%	100	100	100	100

表2 分时电价

Table 2 Time-of-use price

时段	价格/[元·(kW·h) ⁻¹]
峰时(07:00—13:00)	1.5
平时(13:00—16:00)	0.8
峰时(16:00—23:00)	1.5
谷时(23:00—07:00)	0.5

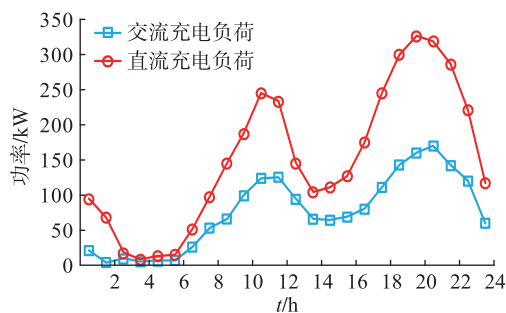


图5 电动汽车充电负荷曲线
Fig.5 EVs charging load curve

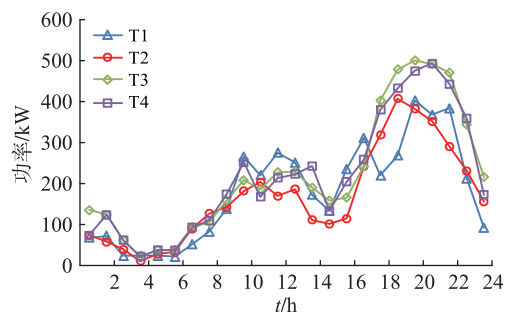


图6 各台区居民负荷曲线

Fig.6 Regular load curve in each district

5.2 算例结果分析

5.2.1 交流充电站的一维安全经济边界分析

基于给定的电动汽车直流充电负荷和居民用电负荷,得到交流充电站的日内安全经济边界如图7所示。分析图5—图7可知,交流充电站的安全经济边界曲线与以上用电负荷曲线的走势呈负相关。具体而言,由于凌晨时段(00:00—06:00)的居民用电负荷和直流充电负荷较低,交流充电站最大可接

入 662 kW 的充电负荷;随着直流充电负荷和居民用电负荷增加,交流充电站可接入充电负荷随之降低,尤其是在晚高峰时段(19:00—21:00)的 20:00 时仅可接入 164 kW。

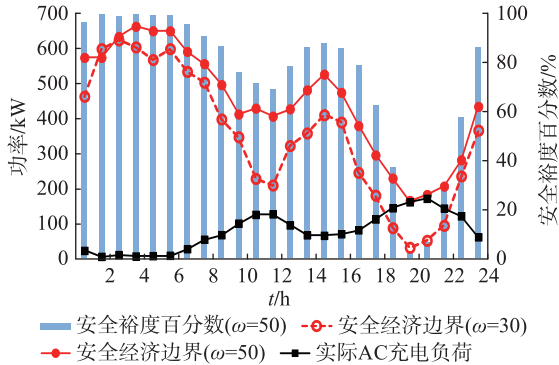


图7 交流充电站的安全经济边界

Fig.7 Security-economic boundary of AC charging station

由图7可知,20:00和21:00时,实际接入量与最大可接入量十分接近,安全裕度百分数仅有2.4%和6.07%。该时段内柔性台区对电动汽车随机接入的应对能力有限,若对交流充电站中的电动汽车充电管理不当,则容易造成运行点位于安全经济边界之外,导致台区运行成本超标或过载运行。

5.2.2 直流充电站的一维安全经济边界分析

基于给定的电动汽车交流充电负荷和居民用电负荷,得到直流充电站的日内安全经济边界如图8所示。不同于交流充电站,直流充电站的安全经济边界在23:00—次日18:00的时段内始终保持在680 kW,与交流充电负荷和居民负荷的日内波动无关。这是由于直流充电站的最大可接入量受限于储能和4台VSC的容量,而这些容量在该时段内不会受到上述负荷波动的影响,因此直流充电站的安全经济边界在相应时段内保持不变。对于19:00—22:00,交流充电负荷和居民用电负荷同时达到高峰,需要通过负荷转供来避免单台变压器过载。因此,4台VSC的部分容量将用来支撑负荷转供的功能,导致直流充电站的最大可接入负荷直接受到上述负荷波动的影响,形成如图8所示的曲线。

由图8可知,20:00和21:00时,实际接入量与最大可接入量十分接近,安全裕度百分数仅有4.67%和10.29%。

5.2.3 台区T1居民负荷的一维安全经济边界分析

基于给定的电动汽车交直流充电负荷所得到的台区T1中居民负荷的安全经济边界如图9所示。分析图5和图9可知,台区T1中居民负荷的安全经济边界曲线与电动汽车交流充电负荷曲线的走势

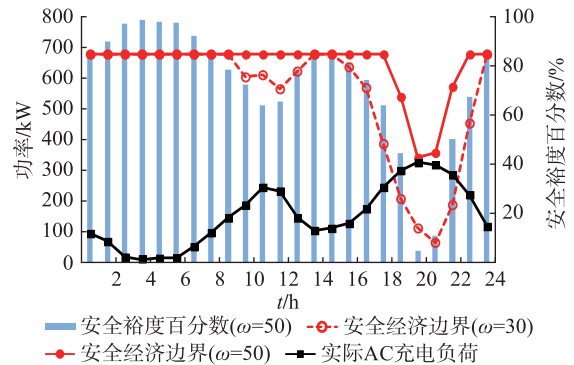


图8 直流充电站的安全经济边界

Fig.8 Security-economic boundary of DC charging station

呈负相关。例如,11:00—12:00电动汽车充电负荷稍有增长,而居民负荷的安全经济边界曲线稍有回落;20:00—22:00的趋势与之相反。上述现象是由于电动汽车的交流充电负荷与T1台区居民负荷同时由变压器t1供电,即便是在存在转供的时段,二者也是由同一电源供电。

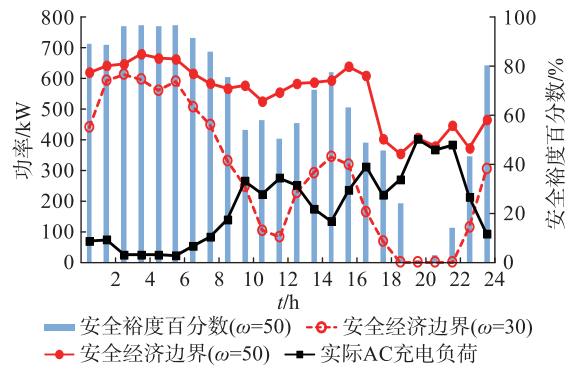


图9 T1台区居民负荷的安全经济边界

Fig.9 Security-economic boundary of resident load in T1 area

由图9可知,20:00和21:00时,实际接入量与最大可接入量十分接近,安全裕度百分数仅有0.98%和2.91%。

5.2.4 台区T2居民负荷的一维安全经济边界分析

基于给定的电动汽车交直流充电负荷所得到的台区T2中居民负荷的安全经济边界如图10所示。不同于台区T1,台区T2中居民负荷的安全经济边界曲线与电动汽车交流充电负荷曲线的走势无明显相关性,这是由于台区T2内无充电站接入。此外,台区T2在负荷高峰期的安全经济裕度较大(19:00时具有17%的安全裕度),因此对居民负荷随机接入的应对能力较T1更强。

5.2.5 安全经济指标对一维安全经济边界的影响

图7—图10中的红色虚线表示在安全经济指标为30元时,相应对象的安全经济运行边界。由于

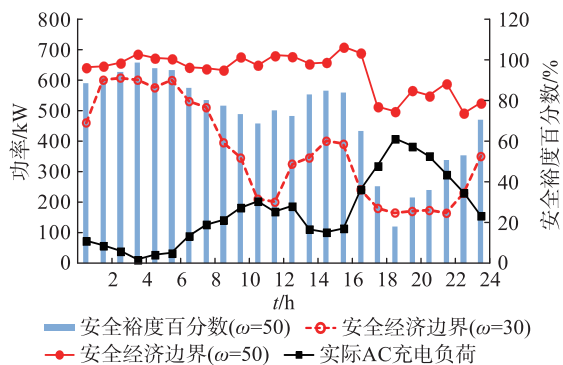


图 10 T2 台区居民负荷的安全经济边界
Fig.10 Security-economic boundary of resident load in T2 area

变压器、变流器的运行损耗均与所流经的功率呈正相关,因此当安全经济指标较低时,会限制变压器、变流器的运行功率,显著减少柔性台区内的可接入负荷量。图 9 中 19:00—22:00 的最大可接入量为 0,意味着若要确保电动汽车充电和柔性台区的安全经济运行,需要削减该时段内 T1 台区的所有居民负荷。

5.2.6 二维安全经济运行域分析

选取交流充电站和直流充电站的接入负荷作为决策变量,获取二者的安全经济运行边界点,并采用凸包络技术构造柔性台区的二维安全经济运行域。

图 11 展示了午间用电高峰时刻(12:00)、用电低谷时刻(15:00)以及晚间用电高峰时刻(20:00)的柔性台区安全经济运行域。其中,交流充电桩的最大可接入功率受居民负荷曲线影响(对比图 6),较直流充电桩更为显著,安全经济运行域的面积也呈现出与居民负荷曲线相返的变化趋势,即安全经济运行域的面积随居民负荷的增加而减小。该结论与一维安全经济运行边界类似。此外,在交流充电桩的接入功率较小时,各时刻的直流充电桩的最大可接入功率均为 680 kW,这是由于直流充电站的最大可接入量受限于储能和 4 台 VSC 的容量。当交流充电桩的接入负荷较小时,4 台 VSC 的容量未被利用于转供,因此直流充电站的安全经济边界始终保持在 680 kW。随着交流充电负荷的增加,VSC 的部分容量将被利用于负荷转供,进而确保变压器负载率维持在允许范围内。因此,直流充电站的最大可接入负荷会相应减小,最终形成如图 11 所示的安全经济运行域形态。

进一步地,通过对比各时段的运行域形态,可以发现运行域上边界的拐点的出现时刻各不相同。具体而言,各时刻内,运行域上边界的拐点分别出

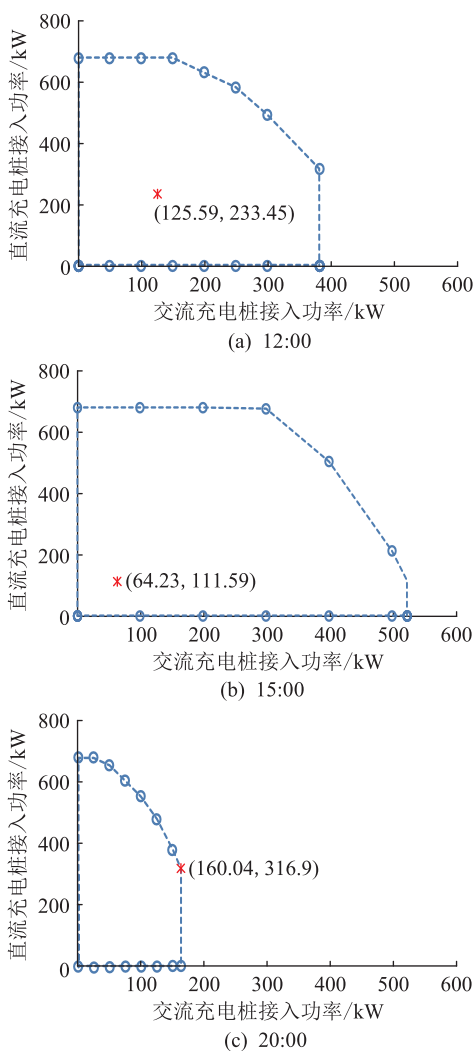


图 11 不同时刻的柔性台区二维安全经济运行域
Fig.11 Two-dimensional security-economic region at different times

现在交流充电站接入负荷达到 200 kW,300 kW 和 50 kW 时。这是因为各时刻的居民负荷大小不同,而变压器容量和 VSC 容量是固定的,因此对于用电高峰期(20:00),交流充电站接入少量充电负荷时便会触发负荷转供,进而占用 VSC 的容量,影响直流充电站的最大可接入量;相反地,对于用电低谷期(15:00),交流充电站可以在接入更多充电负荷后才触发负荷转供,因此直流充电站的最大可接入量可以维持更久。

图 11 中的红色标记及其坐标表示相应时刻的柔性台区实际运行点。由此可以看出,柔性台区在 12:00 和 15:00 的运行点距离安全经济运行边界较远,因此柔性台区拥有较强的应对负荷不确定性接入的能力。相反,对于 20:00 的柔性台区运行点,其几乎位于安全经济运行域的边界上,虽然仍能确保满足安全约束和经济约束,但是台区应对负荷不确定性接入的能力十分有限,若管理不当,则容易造

成运行点位于安全经济运行域之外,导致台区运行成本超标或过载运行。

6 安全经济运行边界/运行域的工程应用前景分析

一维安全经济边界提供了特定节点在安全经济约束下的最大可接入负荷值,可以作为台区安全经济运行管理的参考。具体而言,调度人员根据其他节点负荷接入的预测值,通过求解若干优化问题得到目标节点的最大可接入量,基于此,通过相应的管理机制(例如价格激励机制或直接控制)严格控制相应节点的负荷接入,实现主动调度,从源头上预防台区的高风险、高成本运行。上述过程中,所提出的“安全裕度百分数”能够为调度人员提供直观的系统运行状态和安全裕度,便于调度人员快速判断系统的安全状态,对负荷接入量进行在线控制和引导。

二维安全经济运行域考虑了交流充电站和直流充电站的协同管理,即电动汽车接入负荷由柔性台区调度人员统一管理。在该场景下,调度人员可以同时管理两充电站的负荷接入,理论上可以实现更高的经济效益并进一步提高安全裕度。此外,基于凸包络来构造安全经济运行域,与传统的基于超平面的构造方法相比,该方法在确保计算效率的同时具有更高的拟合精度,能够满足在线运行的要求和工程精度。另一方面,类似于“安全裕度百分数”的概念,文中所提出的二维安全经济运行域同样可以由“距离”“面积”^[26]“体积”^[27-28](针对三维运行域)来衡量当前运行点的安全经济裕度以及当前断面的安全经济状态,为调度人员提供丰富而直观的运行状态量度,方便其快速判断系统的安全经济状态,对负荷接入量进行在线控制和引导。

7 结语

针对柔性台区的安全经济运行,文中建立了一维安全经济运行边界模型和二维安全经济运行域模型。仿真结果证实了所提模型的有效性,分析了安全经济指标对运行边界的影响,探讨了运行边界和运行域的工程应用前景。

考虑 $N-1$ 模式下的台区安全经济运行边界,以及考虑居民用电负荷和电动汽车快充负荷随机性的鲁棒安全经济运行边界,将是下一步的研究方向。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“面向规模化电动汽车的柔性台区协同运行与控制

关键技术研究及工程示范”(J2019066)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 王金明,张卫国,朱庆,等. 含风电及电动汽车虚拟电厂参与电力市场的优化调度策略[J]. 电力需求侧管理,2020,22(1):28-34.
WANG Jinming, ZHANG Weiguo, ZHU Qing, et al. Optimal scheduling strategy for VPP participating in the power market including wind power and EV[J]. Power Demand Side Management,2020,22(1):28-34.
- [2] 蒯圣宇,田佳,台德群,等. 计及分布式能源与电动汽车接入的空间负荷预测[J]. 电力需求侧管理,2019,21(1):47-51.
KUAI Shengyu, TIAN Jiantai, TAI Dequn, et al. Space load forecasting considering distributed energy and electric vehicles[J]. Power Demand Side Management,2019,21(1):47-51.
- [3] 徐荆州,葛磊蛟,杨昌海,等. 考虑用户便捷性和配网接纳能力的EV充电站选址定容[J]. 电力工程技术,2020,39(4):112-119,142.
XU Jingzhou, GE Leijiao, YANG Changhai, et al. Location and capacity selection method of EV charging stations considering transportation convenience and distribution network capacity[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(4):112-119,142.
- [4] 胡泽春,宋永华,徐智威,等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):1-10,25.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(4):1-10,25.
- [5] 吕思,卫志农. 基于动态无线充电的电力-交通网协同优化运行研究综述与展望[J]. 全球能源互联网,2019,2(5):484-491.
LYU Si, WEI Zhinong. Coupling electricity and transportation networks to achieve dynamic wireless charging: review and prospects[J]. Global Energy Interconnection,2019,2(5):484-491.
- [6] 陈吕鹏,潘振宇,余涛,等. 基于动态非合作博弈的大规模电动汽车实时优化调度[J]. 电力系统自动化,2019,43(24):32-40,66.
CHEN Lyupeng, PAN Zhenning, YU Tao, et al. Real-time optimal dispatch for large-scale electric vehicles based on dynamic non-cooperative game theory[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(24):32-40,66.
- [7] 占恺峤,胡泽春,宋永华,等. 考虑三相负荷平衡的电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):201-207.
ZHAN Kaiqiao, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. A coordinated charging strategy for electric vehicle three-phase load balance[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(17):201-207.
- [8] SUN B, HUANG Z, TAN X Q, et al. Optimal scheduling for electric vehicle charging with discrete charging levels in distribution grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(2):

- 624-634.
- [9] 聂津,陈涵,叶必超. 基于充放电模型的电动汽车充电价格设定策略[J]. 浙江电力,2019,38(9):27-33.
NIE Jin, CHEN Han, YE Bichao. Charging prices setting strategy of electric vehicle based on V2G model[J]. Zhejiang Electric Power,2019,38(9):27-33.
- [10] 孙辉,沈钟浩,周玮,等. 电动汽车群响应的主动配电网阻塞调度研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(19):5549-5559,5832.
SUN Hui, SHEN Zhonghao, ZHOU Wei, et al. Congestion-dispatch research of active distribution network with electric vehicle group response[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(19):5549-5559,5832.
- [11] TAN J, WANG L F. Real-time charging navigation of electric vehicles to fast charging stations;a hierarchical game approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2017,8(2):846-856.
- [12] 余晓玲,余晓婷,韩晓娟. 基于思维进化算法的电动汽车有序充电控制策略[J]. 电力工程技术,2017,36(6):58-62.
YU Xiaoling, YU Xiaoting, HAN Xiaojuan. Acoordinated charging strategy for PEV charging stations based on mind evolutionary algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017,36(6):58-62.
- [13] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):64-73.
SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):64-73.
- [14] 王朝亮,吕文韬,许烽,等. 柔性直流配电网 MMC 子模块级联数量优化设计[J]. 浙江电力,2019,38(4):8-12.
WANG Chaoliang, LYU Wentao, XU Feng, et al. Optimum design of cascading number of MMC sub-modules in intelligent flexible DC distribution network[J]. Zhejiang Electric Power, 2019,38(4):8-12.
- [15] 黄健昂,魏承志,文安. 计及源荷不确定性的柔性直流配电网分层协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(6):106-112,127.
HUANG Jian'ang, WEI Chengzhi, WEN An. Hierarchical coordinated control strategy for flexible DC distribution network considering uncertainties of source and load[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(6):106-112,127.
- [16] 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 Shen, WEI Gang, MA Leipeng, et al. Power supply capability evaluation of DC distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(9):58-64.
- [17] 张晓勇,胡婷立,徐瑞林,等. 基于直流线路的低压配电网随机负荷转供方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):83-88.
ZHANG Xiaoyong, HU Tingli, XU Ruilin, et al. An approach for random load transfer in low-voltage distribution network using DC tie lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(23):83-88.
- [18] 孙国强,徐广开,沈培锋,等. 规模化电动汽车负荷的柔性台区协同经济调度[J]. 电网技术,2020,44(11):4395-4404.
SUN Guoqiang, XU Guangkai, SHEN Peifeng, et al. Coordinated economic dispatch of flexible district for large-scale electric vehicle load [J]. Power System Technology, 2020,44(11):4395-4404.
- [19] 沈培锋,王徐延,张昊亮,等. 考虑规模化快充负荷的低压互联配电网台区风险评估[J]. 中国电力,2021,54(5):56-64.
SHEN Peifeng, WANG Xuyan, ZHANG Haoliang, et al. Risk assessment of low-voltage interconnected distribution districts considering large-scale fast charging load[J]. Electric Power, 2021,54(5):56-64.
- [20] GARCÍA-LÓPEZ F D P, BARRAGÁN-VILLAREJO M, MAZA-ORTEGA J M. Grid-friendly integration of electric vehicle fast charging station based on multiterminal DC link[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020,114:105341.
- [21] 许喆,陈玮,丁军策,等. 南方区域各市场主体同台竞价交易输电价格机制设计[J]. 电力需求侧管理,2020,22(5):88-92.
XU Zhe, CHEN Wei, DING Junce, et al. Design of the transmission price mechanism for the samestage bidding and trading of market entities in the southern region [J]. Power Demand Side Management,2020,22(5):88-92.
- [22] 奇珂,陈听儒,姜宁,等. 峰谷电价背景下考虑电动汽车用户行为的配网规划研究[J]. 电力需求侧管理,2019,21(2):5-9.
WU Qike, CHEN Xinru, JIANG Ning, et al. Research on distribution network planning considering electric vehicle user behavior in peak and valley price context [J]. Power Demand Side Management,2019,21(2):5-9.
- [23] 王博,肖峻,周济,等. 主动配电网中分布式电源和微网的运行域[J]. 电网技术,2017,41(2):363-372.
WANG Bo, XIAO Jun, ZHOU Ji, et al. Dispatchable region of distributed generators and microgrids in distribution systems [J]. Power System Technology,2017,41(2):363-372.
- [24] 刘柳,王丹,贾宏杰,等. 综合能源配电系统运行域模型[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):1-9.
LIU Liu, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Operation region model for integrated energy distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(10):1-9.
- [25] 邱海峰,赵波,林达,等. 计及储能损耗和换流成本的交直流混合微网区域协调调度[J]. 电力系统自动化,2017,41(23):29-37.
QIU Haifeng, ZHAO Bo, LIN Da, et al. Regional coordinated dispatch in AC/DC hybrid microgrids considering energy storage loss and converter cost[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(23):29-37.
- [26] CHEN S, WEI Z N, SUN G Q, et al. Convex hull based robust security region for electricity-gas integrated energy systems

- [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34 (3): 1740-1748.
- [27] 肖峻,秋泽楷,宋晨辉. 配电网安全域的表面积、体表比及圆润度[J/OL]. 中国电机工程学报;1-17[2021-03-11]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.200369>.
XIAO Jun, QIU Zekai, SONG Chenhui. Operation region model for integrated energy distribution system[J/OL]. Proceedings of the CSEE;1-17[2021-03-11]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.200369>.
- [28] 肖峻,张苗苗,祖国强,等. 配电系统安全域的体积[J]. 中国电机工程学报,2017,37(8):2222-2231.
XIAO Jun, ZHANG Miaomiao, ZU Guoqiang, et al. Volume of

distribution system security region [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2222-2231.

作者简介:



谭瑾

谭瑾(1968),男,硕士,高级工程师,从事电力系统自动化相关工作(E-mail:1741499661@qq.com);

王勇(1974),男,硕士,高级工程师,从事电力系统运行相关工作;

马洲俊(1986),男,博士,工程师,从事电网调控运行与优化规划相关工作。

Security-economy operational boundary of flexible district considering large-scale EV charging loads

TAN Jin¹, WANG Yong¹, MA Zhoujun¹, WANG Zicheng¹, XU Guangkai², SUN Guoqiang²

(1. Nanjing Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Flexible district which interconnects several AC districts through the flexible devices is able to make full use of capacity of transformers and cope with large-scale EV charging loads. The coupled districts could be co-operated. Hence, it enhances both the security and economy. The security-economy operational boundary model, as well as the concept of security margin percentage, is proposed for the operation of flexible district. Furthermore, a convex-hull based two-dimensional security-economy region is constructed to promote the co-operation among numerous charging stations. Numerical results demonstrate both the extensibility and the practicality of the proposed security-economy operational boundary. Besides, numerical results reveal that economic index has dramatic influence on the shape of security-economy operational boundary, and the boundary shapes for AC charging station and DC charging station are different.

Keywords: distribution district low voltage interconnection; fast charging load of electric vehicle; security operational boundary; economy operational boundary; AC-DC distribution network; convex hull

(编辑 钱悦)