

城市配电网DG消纳能力曲线的计算方法与分析应用

肖峻¹,王传奇¹,李晓辉²

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072;2. 国网天津市电力公司营销服务中心,天津 300202)

摘要:为了完整描述城市配电网的分布式发电(DG)消纳能力(TAC),探究DG TAC曲线的提升措施,提出一种城市配电网DG TAC曲线的计算方法。介绍安全域和安全边界;建立考虑馈线负荷实际情况和电压约束的TAC曲线模型,该模型利用日负荷曲线确定状态空间,通过对边界点进行电压校验得到TAC曲线。算例验证了所提方法的有效性。通过分析TAC曲线的负荷影响因素发现,只有瓶颈馈线段(组)下游负荷对TAC曲线有影响,提出增加瓶颈馈线段(组)下游负荷和瓶颈馈线段(组)扩容2种TAC曲线提升措施。提出TAC曲线在指导DG和负荷接入、导线更换方面的应用方法。

关键词:城市配电网;DG;TAC曲线;日负荷曲线;瓶颈馈线段(组)

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202304011

0 引言

分布式发电(distributed generation, DG)是新能源发电并网运行的一种有效形式^[1]。随着DG规模化接入配电网,传统无源配电网逐步演化为有源配电网^[2]。有源配电网的安全运行面临新的问题,如线路过载、电压越限、潮流大小和方向改变等^[3]。在此背景下,如何确定和提高配电网可以利用DG出力的极限,成为一个备受关注的问题。

国内外学者普遍使用消纳能力(total accommodation capability, TAC)表征配电网的DG承载能力。TAC的定义为,在满足一定运行方式及安全约束的前提下,配电网可以利用的最大DG出力^[4]。文献[5]提出TAC不能超过25%的设备额定容量,该结果过于保守。文献[6]建立一系列宏观的渗透率指标,并利用DG最大匹配现状负荷的程度确定TAC,但是未考虑安全约束不适用于具体配电网。文献[7-8]建立DG接入配电网的TAC评估优化模型,利用分段计算方法或最优潮流对模型进行求解,但是单次求解的时间较长,不适用于负荷波动大的场景,并且只能得到TAC对应的单一的DG分布情况。文献[9]根据选择的负荷/DG场景,采用蒙特卡罗随机模拟法评估配电网的TAC,但结果受所选场景的影响较大,并且场景有限导致不能反映完整的TAC。针对上述问题,文献[10]在供电能力(total supply capability, TSC)曲线^[11]的基础上,基于有源配电网的安全域和安全边界模型^[12-13],提出TAC曲线,TAC曲线反映了有源配电网在任意负荷/DG分布下的TAC,

但“任意负荷/DG分布”的假设条件仅适合从理论上分析TAC,计算得到的某些负荷分布下的TAC过于理想,在实际系统中难以达到,对于实际城市配电网,还需考虑具体的边界条件。研究表明,负荷是影响TAC的一个重要因素^[14],实际馈线中的负荷接入位置和大小都不是任意的^[15-16],因此,考虑馈线的实际负荷情况是TAC曲线实际应用的关键。

在确定配电网的TAC后,还需进一步探究TAC的提升措施。文献[9]提出利用逆变器解决电压越限的问题进而提升TAC的方法,但该方法的经济性差,控制复杂且TAC提升有限。文献[17]引入高载能负荷的措施以及文献[18-19]允许功率倒送、跨区域多级协同的措施能够显著提升TAC,但只能反映具体场景下的TAC提升效果,不能反映系统完整TAC的提升效果。因此,有必要结合TAC曲线的特点,分析负荷对TAC曲线的影响,从而帮助规划人员合理配置负荷,以显著提升TAC。

本文提出一种城市配电网DG TAC曲线的计算方法。首先,介绍安全域和安全边界;然后,在分析馈线负荷实际情况的基础上,提出本文的TAC曲线模型及绘制方法;最后,采用改进的IEEE 33节点系统算例进行验证,并与现有方法进行对比,基于所发现的负荷对TAC曲线的影响规律,提出2种TAC曲线提升措施,能够明显提升系统完整TAC。

1 安全域与安全边界

由于TAC曲线是通过安全域严格安全边界点绘制而成的,因此需要介绍有源配电网的安全域以及安全边界。

1.1 有源配电网的安全域模型

配电网安全域是状态空间中满足安全约束的所有工作点的集合^[12]。文献[12]针对有源配电网,建立计及 $N-0$ 和 $N-1$ 的安全域模型。我国城市配电网

收稿日期:2022-08-13;修回日期:2023-01-16

在线出版日期:2023-04-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877144)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877144)

普遍采用 $N-1$ 安全准则。关于 TAC 曲线的研究目前仅考虑了正常运行约束,即 $N-0$ 安全约束,采用式(1)所示的 $N-0$ 安全域模型^[10]。

$$\Omega_{\text{TQSR0}} = \left\{ \mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_L \\ \mathbf{W}_{\text{DG}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [S_{L1}, \dots, S_{Lk}, \dots, S_{Ln}]^T \\ [S_{\text{DG}1}, \dots, S_{\text{DG}h}, \dots, S_{\text{DG}m}]^T \end{bmatrix} \right. \\ \left. \begin{aligned} -c_1 &\leq (1+r)(a_{11}S_{L1} + \dots + a_{1k}S_{Lk} + \dots + a_{1n}S_{Ln} + \\ &a_{1(n+1)}S_{\text{DG}1} + \dots + a_{1(n+h)}S_{\text{DG}h} + \dots + a_{1(n+m)}S_{\text{DG}m}) \leq c_1 \\ &\vdots \\ -c_l &\leq (1+r)(a_{l1}S_{L1} + \dots + a_{lk}S_{Lk} + \dots + a_{ln}S_{Ln} + \\ &a_{l(n+1)}S_{\text{DG}1} + \dots + a_{l(n+h)}S_{\text{DG}h} + \dots + a_{l(n+m)}S_{\text{DG}m}) \leq c_l \\ &\vdots \end{aligned} \right\} = \left\{ \mathbf{W} \mid -\mathbf{c} \leq (1+r)[\mathbf{A}_L, \mathbf{A}_{\text{DG}}]\mathbf{W} \leq \mathbf{c} \right\} \quad (1)$$

式中: Ω_{TQSR0} 为有源配电网 $N-0$ 安全域; $\mathbf{W}$ 为工作点; $\mathbf{W}_L$ 为工作点的负荷节点部分; $\mathbf{W}_{\text{DG}}$ 为工作点的 DG 节点部分; S_{Lk} 为第 k 个负荷节点的流出功率; n 为负荷节点数; $S_{\text{DG}h}$ 为第 h 个 DG 节点的注入功率,规定流出功率为正,本文负号仅表示方向; m 为 DG 节点数; r 为网损系数,表示用固定比例计及网损,其值在计算安全边界点交流潮流后确定; c_l 为馈线段 l 的容量; $\mathbf{c}$ 为馈线段容量构成的常向量; $\mathbf{A}_L$ 为负荷系数矩阵, $\mathbf{A}_{\text{DG}}$ 为 DG 系数矩阵; a_{lk} 为 $[\mathbf{A}_L, \mathbf{A}_{\text{DG}}]$ 元素,表示第 k 个元素是否在第 l 组约束中,若在,则其取值为 1,否则其取值为 0。

式(1)中 $-\mathbf{c} \leq (1+r)[\mathbf{A}_L, \mathbf{A}_{\text{DG}}]\mathbf{W}$ 为反向潮流约束,用于保证反向潮流不超过线路容量上限。本文允许 10 kV 变压器和变电站主变(如 110 kV 变压器)向上级电网倒送功率,同时允许 DG 资源丰富的 10 kV 馈线通过变电站 10 kV 母线向其他馈线传输功率^[18]。

1.2 有源配电网的安全边界模型

安全域边界由状态空间边界和安全边界共同构成。根据是否满足严格临界性,安全边界又分为严格安全边界和非严格安全边界。无源配电网的严格临界性定义为任一负荷增长均会违反安全约束,严格安全边界定义为所有具有严格临界性的工作点集合^[13]。与 TSC 曲线^[11]类似,描述配电网 TAC 的 TAC 曲线应选用任一 DG 出力都不能再增加/削减的严格边界。

文献[10]指出有源配电网具有 4 种方向的严格临界性,其中与本文 DG 消纳有关的 2 种临界性是:DG 增长临界性,即任一 DG 出力的增长引起反向潮流越限;DG 削减临界性,即任一 DG 出力的减少引起

正向潮流越限。

满足上述 2 种严格临界性的工作点分别构成 DG 上限边界 $\Omega_{\beta, \text{DG}}^+$ 和 DG 下限边界 $\Omega_{\beta, \text{DG}}^-$ 。将式(1)的部分反向潮流约束取等,且覆盖所有 DG 变量,得到一个 DG 上限边界,如式(2)所示;将式(1)的部分正向潮流约束取等,且覆盖所有 DG 变量,得到一个 DG 下限边界,如式(3)所示。

$$\beta_{\text{DG}^+, j} = \left\{ \mathbf{W} \mid \begin{aligned} &-\mathbf{c}_e = (1+r)[\mathbf{A}_{Le}, \mathbf{A}_{\text{DGe}}]\mathbf{W} \\ &-\mathbf{c}_{ne} < (1+r)[\mathbf{A}_{Lne}, \mathbf{A}_{\text{DGne}}]\mathbf{W} \leq \mathbf{c}_{ne} \\ &\|\mathbf{A}_{\text{DGe}}\|_1 < 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\beta_{\text{DG}^-, j} = \left\{ \mathbf{W} \mid \begin{aligned} &(1+r)[\mathbf{A}_{Le}, \mathbf{A}_{\text{DGe}}]\mathbf{W} = \mathbf{c}_e \\ &-\mathbf{c}_{ne} \leq (1+r)[\mathbf{A}_{Lne}, \mathbf{A}_{\text{DGne}}]\mathbf{W} < \mathbf{c}_{ne} \\ &\|\mathbf{A}_{\text{DGe}}\|_1 < 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\beta_{\text{DG}^+, j}$ 为第 j 个 DG 上限边界; $\beta_{\text{DG}^-, j}$ 为第 j 个 DG 下限边界; $\mathbf{A}_{Le}$ 、 $\mathbf{A}_{\text{DGe}}$ 、 $\mathbf{c}_e$ 分别为取等约束的负荷系数矩阵、DG 系数矩阵和常向量; $\mathbf{A}_{Lne}$ 、 $\mathbf{A}_{\text{DGne}}$ 、 $\mathbf{c}_{ne}$ 分别为不取等约束的负荷系数矩阵、DG 系数矩阵和常向量; $\|\mathbf{A}_{\text{DGe}}\|_1$ 表示计算矩阵中每列元素之和再取最大值,由于 $a_{lk} \geq 0$,因此,利用 $\|\mathbf{A}_{\text{DGe}}\|_1 < 0$ 表示 $\mathbf{A}_{\text{DGe}}$ 中每列均存在不为 0 的元素,即等式约束覆盖所有的 DG 变量。

2 城市配电网 TAC 曲线的建模与绘制

文献[10]通过采样 DG 上限、下限边界以及将其按照 DG 总出力从小到大排序,绘制得到 TAC 上限曲线和 TAC 下限曲线,适合从理论上分析 TAC。为使 TAC 曲线能够实际应用,还需要考虑城市馈线负荷的实际情况和电压约束。

2.1 馈线负荷的实际情况

我国城市配电网普遍采用 $N-1$ 安全准则。在系统正常运行时,馈线需为与其有联络关系的馈线提供备用,因此其接入负荷量受到控制,这导致负载率不高,实际馈线负荷一般与馈线容量有明显差距,例如,单联络馈线满足 $N-1$ 的最大允许负载率不超过馈线容量的 50%^[16]。我国浙江某市配电网各馈线实际日负荷曲线如图 1 所示,图中馈线负荷是以馈线容量为基准的标幺值^[20]。

一般情况下,馈线单个负荷节点的最大负荷更是远小于馈线容量,而文献[10]计算 TAC 曲线时假设节点负荷最大功率可达到馈线容量,这不符合实际情况。为此,本文采用更接近城市配电网实际负荷情况的日负荷曲线来计算 TAC 曲线。

本文发现 TAC 下限曲线仅在理论上存在,当考虑负荷实际情况后, TAC 下限曲线退化为一数值为 0 的水平直线,可以认为该曲线不存在。实际城市配

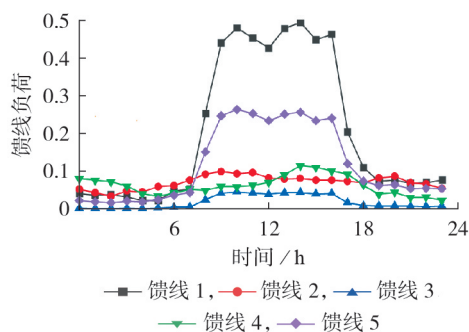


图1 馈线日负荷曲线举例

Fig.1 Example of feeder daily load curves

电网的TAC曲线仅有TAC上限曲线,因此,可将TAC上限曲线简称为TAC曲线。

2.2 TAC曲线模型与绘制

在城市配电网中,负荷水平是影响TAC的重要因素,同时,大规模DG的接入增加了系统电压越限的风险。本文所提TAC曲线模型考虑馈线负荷的实际情况和电压约束,具体模型如下。

在各节点日负荷曲线确定的状态空间中,采样得到具有DG增长临界性且满足电压约束的边界点,计算边界点的DG总出力,将其按从小到大的顺序排序并编号。以排序后的编号为横坐标以及DG总出力为纵坐标绘制曲线。TAC曲线的数学模型 C_{TAC} 如式(4)所示。

$$C_{TAC} = \left\{ \begin{array}{l} V_{W_i}^{DG} \leq V_{W_{i+1}}^{DG} \\ W_i = [W_{Li}, W_{DG_i}] \subset \Omega_{\beta, DG}^+ \\ S_{L, \min} \leq W_{Li} \leq S_{L, \max} \\ \Delta U_{GB}^- \leq \Delta U_i \leq \Delta U_{GB}^+ \\ i \in \{1, 2, 3, \dots\} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中: i 为TAC曲线上的点排序后的编号; $V_{W_i}^{DG}$ 为边界点 W_i 上的DG总出力,即在 W_i 的负荷/DG分布下的TAC; W_{Li} 为 W_i 的负荷节点部分; W_{DG_i} 为 W_i 的DG节点部分; $S_{L, \min}$ 为各节点日负荷曲线谷值组成的向量; $S_{L, \max}$ 为各节点日负荷曲线峰值组成的向量; ΔU_i 为边界点 W_i 的节点电压偏移向量; ΔU_{GB}^+ 、 ΔU_{GB}^- 分别为电压上、下偏移国标值,对于10 kV配电网,其值分别取为7%、-7%^[21]。

针对某一具体的城市配电网,通过式(4)能够计算各种实际负荷分布下配电网消纳DG出力的上限及对应的DG分布,因此TAC曲线描述了配电网的完整TAC。

本文借鉴文献[11]的TSC曲线绘制方法来绘制TAC曲线,步骤如下。

1)确定状态空间。不同于文献[10]中TAC曲线根据馈线容量确定状态空间,本文根据各负荷节点的日负荷曲线峰谷值确定对应的状态空间。

2)按一定步长在状态空间内等间隔采样,生成均匀分布的待判定工作点集合。采样步长可以根据计算规模和精度的要求灵活选取。

3)从工作点集合中筛选出满足式(2)的位于DG上限边界的工作点。

4)对DG上限边界的工作点集合进行电压校验和修正。根据配电网辐射状的特点,采用文献[22]方法计算节点电压偏移,如附录A所示。节点电压偏移 ΔU_i 如式(5)所示,电压约束如式(6)所示。

$$\Delta U_i = A_u W_i \quad (5)$$

$$\Delta U_{GB}^- \leq A_u W_i \leq \Delta U_{GB}^+ \quad (6)$$

式中: A_u 为电压偏移系数矩阵。若边界点满足约束式(6),则保留,否则删除。

5)计算保留工作点的DG总出力,并按照大小对DG上限边界采样点进行排序和编号。

6)以排序后的编号为横坐标以及DG总出力为纵坐标绘制TAC曲线。

3 算例验证与分析

在第2章中,针对一般配电网建立了计及馈线负荷实际情况的TAC曲线模型,这符合配电网规划建设的实际情况。本文的TAC曲线绘制方法是对文献[10]方法的改进,文献[10, 23]表明TAC曲线的绘制方法具有普适性。下面结合具体算例对本文方法进行验证。

3.1 算例简介

IEEE 33节点系统算例如图2所示。

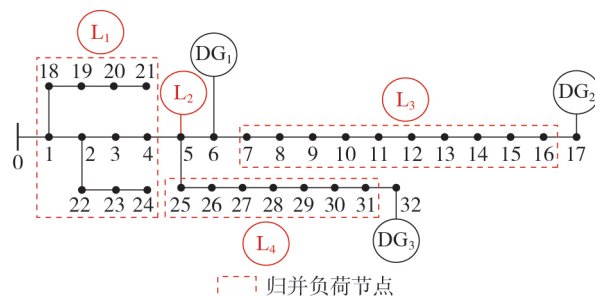


图2 IEEE 33节点系统算例

Fig.2 Example of IEEE 33-bus system

为了模拟10 kV城市配电网,将各线路的阻抗值缩小为原来的1/4,馈线容量为10 MV·A,将低压负荷均等效到10 kV^[22],网损系数 $r=2\%$ 。在节点6、17、32接入DG,单个DG节点的功率变化范围为 $[-10, 0]$ MV·A。对负荷节点进行归并简化,形成3个虚拟负荷节点 L_1 、 L_3 、 L_4 ,改进的系统结构如图3所示,图中B表示支路。

3.2 TAC曲线的计算和绘制

算例的安全域为:

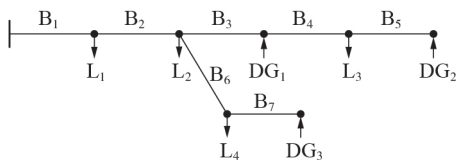


图3 改进的系统结构

Fig.3 Improved system structure

$$\left\{ \begin{array}{l} -10 \text{ MV} \cdot \text{A} \leq (1+r)(S_{L1} + S_{L2} + S_{L3} + S_{L4} + S_{DG1} + \\ S_{DG2} + S_{DG3}) \leq 10 \text{ MV} \cdot \text{A} \\ -10 \text{ MV} \cdot \text{A} \leq (1+r)(S_{L2} + S_{L3} + S_{L4} + S_{DG1} + \\ S_{DG2} + S_{DG3}) \leq 10 \text{ MV} \cdot \text{A} \\ -10 \text{ MV} \cdot \text{A} \leq (1+r)(S_{L3} + S_{DG1} + S_{DG2}) \leq 10 \text{ MV} \cdot \text{A} \quad (7) \\ -10 \text{ MV} \cdot \text{A} \leq (1+r)(S_{L3} + S_{DG2}) \leq 10 \text{ MV} \cdot \text{A} \\ -10 \text{ MV} \cdot \text{A} \leq (1+r)S_{DG2} \leq 10 \text{ MV} \cdot \text{A} \\ -10 \text{ MV} \cdot \text{A} \leq (1+r)(S_{L4} + S_{DG3}) \leq 10 \text{ MV} \cdot \text{A} \\ -10 \text{ MV} \cdot \text{A} \leq (1+r)S_{DG3} \leq 10 \text{ MV} \cdot \text{A} \end{array} \right.$$

根据各负荷节点的日负荷曲线峰谷值确定状态空间。 L_1 — L_4 的日负荷曲线如附录B图B1所示。由图可知, L_1 — L_4 的负荷变化范围分别为 $[0.39, 1.00]$ 、 $[0.05, 0.05]$ 、 $[0.03, 1.40]$ 、 $[0.17, 0.98]$ $\text{MV}\cdot\text{A}$ 。

步长取为 $0.2 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 根据式(2)计算得到边界点 234 560 个, 根据式(5)、(6)计算得到满足电压约束的边界点 22 173 个, 这些边界点构成 TAC 曲线, TAC 曲线情况如表 1 所示。表中: $\mathbf{W}_i = [S_{L1}, S_{L2}, S_{L3}, S_{L4}, S_{DG1}, S_{DG2}, S_{DG3}]$; $\Delta U_{\max}$ 为最大电压偏移; $n_{\max}$ 为对应节点。采用相同的方法, 根据式(3)得到 TAC 下限曲线点。绘制 TAC 曲线, 如图 4 所示, 图中 $\mathbf{W}_{\text{sample}}$ 为某工作点。

表 1 TAC 曲线情况

Table 1 Condition of TAC curve

i	$W_i / (\text{MV} \cdot \text{Å})$	$V_{W_i}^{\text{DG}} / (\text{MV} \cdot \text{Å})$	$\Delta U_{\%}^{\text{max}} /$	n_{max}
1	[0.4, 0, 0, 0.2, -6.0, -0.8, -3.4]	10.2	6.91	32
2	[0.4, 0, 0, 0.2, -6.0, -1.0, -3.2]	10.2	6.73	32
3	[0.4, 0, 0, 0.2, -6.0, -1.2, -3.0]	10.2	6.55	32
4	[0.4, 0, 0, 0.2, -6.2, -0.8, -3.2]	10.2	6.73	32
5	[0.4, 0, 0, 0.2, -6.2, -1.0, -3.0]	10.2	6.55	32
	$\vdots$			
22 129	[1.0, 0, 1.4, 1.0, -6.6, -2.0, -3.8]	12.4	6.88	17
	$\vdots$			
22 138	[1.0, 0, 1.4, 1.0, -7.8, -1.8, -2.8]	12.4	6.61	17
	$\vdots$			
22 169	[1.0, 0, 1.4, 1.0, -9.6, -1.6, -1.2]	12.4	6.37	17
22 170	[1.0, 0, 1.4, 1.0, -9.6, -1.8, -1.0]	12.4	6.73	17
22 171	[1.0, 0, 1.4, 1.0, -9.8, -0.4, -2.2]	12.4	5.34	32
22 172	[1.0, 0, 1.4, 1.0, -9.8, -0.8, -1.8]	12.4	4.98	32
22 173	[1.0, 0, 1.4, 1.0, -9.8, -1.4, -1.2]	12.4	6.03	17

由图4可得如下结论。

1) TAC 曲线最低点为 $10.2 \text{ MV} \cdot \text{A}$, TAC 曲线最

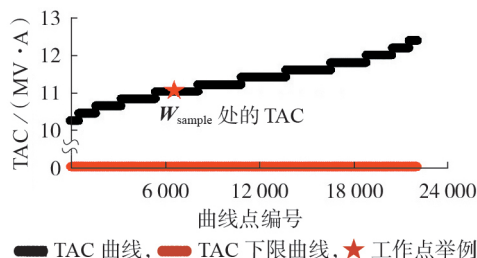


图4 系统的TAC曲线

Fig.4 TAC curve of system

高点为 $12.4 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。根据表 1 计算平均值, 得到平均 $\text{TAC}^{[10]}$ 为 $11.3 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。曲线呈多个水平分段 (图中为 12 段), 这说明同一 TAC 对应多个曲线点, 即多个不同的负荷 / DG 分布状态。

2) TAC 下限曲线值恒为 0。TAC 下限曲线的含义是, 当有源配电网所带总负荷超出馈线段传输功率的上限时, 为保证系统安全所需要的最小 DG 出力^[10]。根据 2.1 节可知, 实际配电网的馈线总负荷均小于馈线容量, 可由上级电网完全支撑, 无需 DG 出力来削减馈线正向潮流, 因此, 实际配电网的 TAC 下限曲线值恒为 0, 可以认为不存在。

3.3 与现有方法的比较

文献[7]方法是计算TAC的一种典型方法,该方法以DG总出力最大为目标函数,约束条件包括潮流约束、节点电压约束、线路容量约束、DG出力约束、与上级电网的联络功率约束以及有载调压变压器的调压范围约束。

在给定负荷分布条件下,利用文献[7]方法计算得到图4中的工作点 $\mathbf{W}_{\text{sample}} = [0.4, 0, 0.2, 0.8, -6.6, -1.2, -3.2]$ MV·A, 工作点 $\mathbf{W}_{\text{sample}}$ 处的TAC位于TAC曲线上,这既验证了本文方法的正确性,也体现出本文方法比现有方法更具优势,能完整刻画配电网的TAC。

4 TAC 曲线的负荷影响因素与 TAC 曲线提升措施

网络结构、馈线容量、馈线负荷、DG 接入位置、调压措施等均可能影响配电系统的 TAC 曲线。本文在现有模型的基础上计及馈线实际负荷,分析负荷因素对 TAC 曲线的影响,并提出提升 TAC 曲线的措施。

4.1 负荷对TAC曲线的影响规律

4.1.1 瓶颈馈线段(组)

瓶颈馈线段(组)的定义为:若某馈线段(组)的反向潮流达到容量上限后,任一DG出力均不能再增加,则该馈线段(组)为瓶颈馈线段(组)。瓶颈馈线段(组)具有以下特征:下游包含全部DG节点以及最少负荷节点的馈线段(组)。对于任一配电网,

可根据该特征确定瓶颈馈线段(组)。

在本文算例系统中,有 1 个瓶颈馈线段(B_2)和 1 个瓶颈馈线组(B_3, B_7),如图 5 所示。在图 5(a)中,支路 B_2 是瓶颈馈线段,其反向潮流达到容量上限后,任一 DG 出力均不能再增加;在图 5(b)中, B_3 和 B_7 的反向潮流同时达到容量上限后,任一 DG 出力均不能再增加。

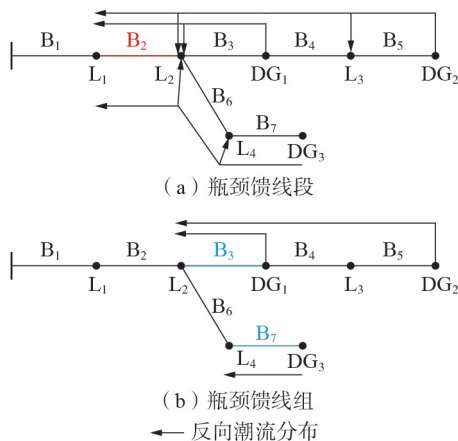


图 5 计算 TAC 曲线时可能的潮流分布
Fig.5 Possible power flow distribution in TAC curve calculation

4.1.2 影响规律

TAC 与瓶颈馈线段(组)上游负荷无关,仅与瓶颈馈线段(组)下游负荷呈正相关,这是由于上游负荷不会影响流过瓶颈馈线段(组)的反向潮流,而下游负荷会影响流过瓶颈馈线段(组)的反向潮流:当下游负荷增加时,流过瓶颈馈线段(组)的反向潮流将减小,为保证瓶颈馈线段(组)满载,需要增加 DG 出力;当下游负荷减小时,流过瓶颈馈线段(组)的反向潮流将增大,为保证瓶颈馈线段(组)不过载,需要减小 DG 出力。因此,TAC 曲线仅与特定位置负荷,即瓶颈馈线段(组)下游负荷有关,负荷对 TAC 曲线的影响规律如下。

1) 瓶颈馈线段(组)上游负荷变化对 TAC 曲线无影响。

2) 瓶颈馈线段(组)下游负荷峰值减小时,TAC 曲线高点下降;瓶颈馈线段(组)下游负荷谷值增大时,TAC 曲线低点上升。

瓶颈馈线段(组)上游负荷 L_1 和瓶颈馈线段(组)下游负荷 L_3, L_4 及其削峰填谷情况如附录 B 图 B2 所示,根据这些信息,在图 B1(场景 0)的基础上设计更多的场景来验证不同位置负荷对 TAC 曲线的影响规律。各负荷场景设置如表 2 所示。

场景 0—3 下的 TAC 曲线如图 6 所示。由图可知:场景 2 与场景 0 下的 TAC 曲线完全重合,场景 3 与场景 1 下的 TAC 曲线完全重合,这表明 TAC 曲线

表 2 负荷场景设置

Table 2 Load scenario setting

场景	变化情况		功率 / ($\text{MV} \cdot \text{A}$)		
	L_1	L_3, L_4	L_1	L_3	L_4
0	不变	不变	[0.39, 0.90]	[0.03, 1.40]	[0.17, 0.98]
1	不变	削峰填谷	[0.39, 0.90]	[0.40, 1.00]	[0.50, 0.70]
2	削峰填谷	不变	[0.50, 0.80]	[0.03, 1.40]	[0.17, 0.98]
3	削峰填谷	削峰填谷	[0.50, 0.80]	[0.40, 1.00]	[0.50, 0.70]

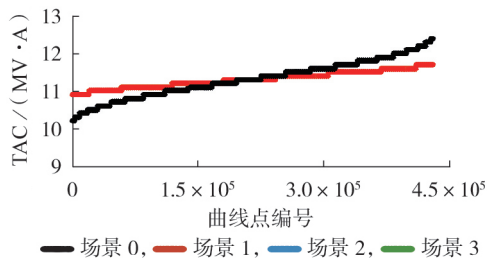


图 6 场景 0—3 下的 TAC 曲线

Fig.6 TAC curves under Scenario 0 to 3

与瓶颈馈线段(组)上游负荷无关;相较于场景 0(场景 2),在场景 1(场景 3)下,下游负荷峰值减小 $0.68 \text{ MV} \cdot \text{A}$, TAC 曲线极大值由 $12.4 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 减小至 $11.7 \text{ MV} \cdot \text{A}$,下游负荷谷值增大 $0.7 \text{ MV} \cdot \text{A}$, TAC 曲线极小值由 $10.2 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 增加至 $10.9 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。

4.2 TAC 曲线的提升措施

负荷增加与馈线段(组)扩容能够提升配电网容纳 DG 的能力,从而实现 TAC 曲线的提升,但是本文研究发现,并不是任一位置的负荷增加和馈线段(组)扩容均能带来 TAC 曲线的提升。基于负荷对 TAC 曲线的影响规律,本文对上述 2 种提升 TAC 曲线的措施进行进一步的细化,具体如下。

1) 措施 1: 增加瓶颈馈线段(组)下游负荷,这是由于 TAC 曲线仅与瓶颈馈线段(组)下游负荷呈正相关。

2) 措施 2: 瓶颈馈线段(组)扩容,这是由于瓶颈馈线段(组)是限制 TAC 曲线的一个主要因素。

在相同大小的新负荷接入下,措施 1 可以实现 TAC 曲线提升的最大化;措施 2 针对的是具体的馈线段(组),可以减少额外线路扩容的投资。例如,对算例系统分别采取上述 2 种措施:在采取措施 1 后,新接入负荷用户使得 L_3 功率增加 $2.0 \text{ MV} \cdot \text{A}$;在采取措施 2 后,将节点 4 与节点 5 之间的馈线段从 $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 扩容到 $11 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。图 7 展示了 2 种 TAC 曲线提升措施的效果。

由图 7 可知:在采取措施后,TAC 曲线得到整体提升;在采取措施 1 后,曲线极小值由 $10.2 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 增加至 $12.2 \text{ MV} \cdot \text{A}$,曲线极大值由 $12.4 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 增加至 $14.4 \text{ MV} \cdot \text{A}$,平均 TAC 增加 $1.9 \text{ MV} \cdot \text{A}$;在采取措施 2

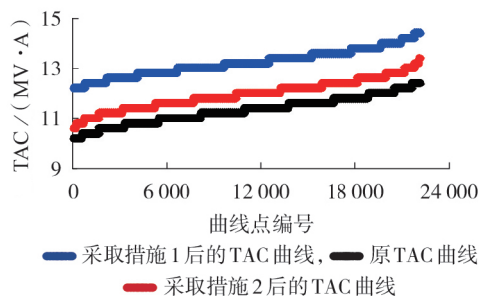


图7 2种TAC曲线提升措施的效果

Fig.7 Effect of two TAC curve improvement measures

后,曲线极小值由 $10.2 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 增加至 $10.6 \text{ MV}\cdot\text{A}$,曲线极大值由 $12.4 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 增加至 $13.4 \text{ MV}\cdot\text{A}$,平均TAC增加 $0.6 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。

从工程实际角度,上述2种措施均能在配电网的发展中进行实施:措施1可在供电业务扩展中新接入负荷时进行实施;措施2可在改造工程中更换导线时进行实施。措施1无须增加投资,更具优先性;措施2需要额外投资,宜与配电网瓶颈馈线段(组)改造相结合,该措施适用于线路容量约束强于电压约束的配电网,即一般的城市配电网。

5 TAC曲线的应用

TAC曲线包含配电系统所有的安全边界点信息和每个边界点的负荷/DG在馈线上的分布数据,因此,利用TAC曲线可为系统规划提供帮助。

5.1 DG接入

TAC曲线可以用于指导DG接入。TAC点的TAC为DG最大安装容量的确定提供了直接依据。考虑到DG的可调节能力以及需求响应能力,实际中可以适当增加DG的安装容量。此外,由于业主安装DG的规模以及容量往往受到客观因素和主观因素的限制,配电网中不同位置的DG可开发潜力是不同的。利用本文方法可以在DG可开发潜力较小位置降低TAC,以换取DG可开发潜力较大位置TAC的提升。例如:表1中编号为22 129时, DG_1 — DG_3 的注入功率分别为 -6.6 、 -2.0 、 $-3.8 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。 DG_1 所在位置是可开发潜力最大的位置,其需求尚未被满足;表1中编号为22 138时,分别减小 DG_2 、 DG_3 的TAC 0.2 、 $1.0 \text{ MV}\cdot\text{A}$,可换取 DG_1 的TAC增大 $1.2 \text{ MV}\cdot\text{A}$,从而可满足 DG_1 所在位置的需求。

5.2 负荷接入

相较于现有以TSC为目标确定用户接入位置的方法^[24],本文方法在指导用户接入位置选择时可以同时提高系统负载率和TAC。例如,根据4.2节的措施1,在下游负荷 L_3 处新接入 $2 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 的用户负荷来提高系统负载率,图7中采取措施1后的TAC曲线整体提升,平均TAC增加了 $1.9 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。

5.3 导线更换

相较于传统配电网扩展规划方法得到的多条线路扩展规划^[25]方案,本文方法聚焦于容量约束对TAC的限制,确保所得导线更换方案能明显提升系统TAC。例如,根据4.2节的措施2,将节点4和节点5之间的导线容量从 $10 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 扩大到 $11 \text{ MV}\cdot\text{A}$,图7中采取措施2后的TAC曲线整体提升,平均TAC增加了 $0.6 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。

6 结论

对于有源配电网,DG TAC不应仅用1个数值来表示,而应用1条TAC曲线来表示,该曲线描述了各种负荷/DG分布下的TAC。本文提出考虑馈线实际负荷和电压约束的TAC曲线模型及绘制方法。通过改进的IEEE 33节点系统算例进行验证。与现有方法的对比表明,本文方法所得结果能更完整有效地描述实际城市配电网的TAC。主要结论如下。

1)当考虑实际负荷后,TAC下限曲线一般不存在,仅存在TAC上限曲线,这是由于实际馈线总负荷小于馈线容量。

2)馈线不同位置负荷对TAC曲线的影响规律为:只有瓶颈馈线段(组)下游负荷会对TAC曲线产生影响,基于此,提出增加瓶颈馈线段(组)下游负荷和瓶颈馈线段(组)扩容2种TAC曲线提升措施。

3)TAC曲线在规划方面具有应用价值,可以指导DG接入、负荷接入和导线更换。

笔者后续将研究低压配电网、N-1下城市配电网的TAC曲线,进一步挖掘TAC曲线在规划运行中的应用价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 叶琳浩. 有源配电网关键运行特性的评价理论与优化提升研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
YE Linhao. Research on evaluation theory and optimization promotion of key operating characteristics of active distribution network[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2018.
- [2] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(18):10-16.
- [3] 张璐,许彪,唐巍,等. 基于功率时空协同的交直流混合配电网调度计划日内修正策略[J]. 电力系统自动化,2021,45(24):106-114.
ZHANG Lu, XU Biao, TANG Wei, et al. Intra-day correction strategy of dispatching plan for AC/DC hybrid distribution network based on spatio-temporal power coordination[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(24):106-114.
- [4] MULENGA E, BOLLEN M H J, ETHERDEN N. A review of hosting capacity quantification methods for photovoltaics in

- low-voltage distribution grids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 115: 105445.
- [5] ISMAEL S M, ABDEL S H E A, ABDELAZIZ A Y, et al. State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation[J]. Renewable Energy, 2019, 130: 1002-1020.
- [6] 赵波, 肖传亮, 徐琛, 等. 基于渗透率的区域配电网分布式光伏并网消纳能力分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 105-111.
- ZHAO Bo, XIAO Chuanliang, XU Chen, et al. Penetration based accommodation capacity analysis on distributed photovoltaic connection in regional distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 105-111.
- [7] OCHOA L, DENT C, HARRISON G. Distribution network capacity assessment: variable DG and active networks[C]// IEEE PES General Meeting. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2010: 1.
- [8] ALTURKI M, KHODAEI A, PAASO A, et al. Optimization-based distribution grid hosting capacity calculations[J]. Applied Energy, 2018, 219: 350-360.
- [9] 姚宏民, 杜欣慧, 李廷钧, 等. 光伏高渗透率下配电网消纳能力模拟及电压控制策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 462-469.
- YAO Hongmin, DU Xinhui, LI Tingjun, et al. Simulation of consumption capacity and voltage control strategy of distribution network with high penetration of photovoltaics[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 462-469.
- [10] XIAO Jun, WANG Chuanqi, SHE Buxin, et al. Total supply and accommodation capability curves for active distribution networks: concept and model[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 133: 107279.
- [11] 肖峻, 张苗苗, 司超然, 等. 配电网的供电能力分布[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3326-3332.
- XIAO Jun, ZHANG Miaomiao, SI Chaoran, et al. Supply capability distribution of distribution systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3326-3332.
- [12] ZU Guoqiang, XIAO Jun, SUN Kai. Mathematical base and deduction of security region for distribution systems with DER[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2892-2903.
- [13] 肖峻, 肖居承, 张黎元, 等. 配电网的严格与非严格安全边界[J]. 电工技术学报, 2019, 34(12): 2637-2648.
- XIAO Jun, XIAO Jucheng, ZHANG Liyuan, et al. Strict and non-strict security boundary of distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(12): 2637-2648.
- [14] 邱革非, 何超, 骆钊, 等. 考虑新能源消纳及需求响应不确定性的配电网主从博弈经济调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 66-72.
- QIU Gefei, HE Chao, LUO Zhao, et al. Economic dispatch of Stackelberg game in distribution network considering new energy consumption and uncertainty of demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 66-72.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 城市配电网规划设计规范: GB 50613—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [16] 肖峻, 余步鑫. 配电网接线模式的综合效率评价[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3769-3781.
- XIAO Jun, SHE Buxin. Comprehensive efficiency evaluation on connection modes in distribution networks[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3769-3781.
- [17] 文晶, 刘文颖, 谢昶, 等. 计及风电消纳效益的电力系统源荷协调二层优化模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 247-256.
- WEN Jing, LIU Wenyong, XIE Chang, et al. Source-load coordination optimal model considering wind power consumptive benefits based on bi-level programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 247-256.
- [18] 姚慧芳, 李勇, 谭益, 等. 考虑电量外送的多电压等级电网分布式电源优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 54-62.
- YAO Huifang, LI Yong, TAN Yi, et al. Optimal allocation of distributed generations considering power export in multi-voltage level grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 54-62.
- [19] 张彦涛, 宋炳兵, 周毅, 等. 基于多级协同的受端电网接纳能力评估分析方法及应用[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 121-126.
- ZHANG Yantao, SONG Bingbing, ZHOU Yi, et al. Evaluation and analysis method of receiving end power grid acceptance capacity based on multi-level collaboration and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 121-126.
- [20] 孙充勃, 李敬如, 罗凤章, 等. 考虑分布式电源接入的配电系统典型算例设计[J]. 电力建设, 2020, 41(10): 47-62.
- SUN Chongbo, LI Jingru, LUO Fengzhang, et al. Typical case design of distribution system considering DG integration[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(10): 47-62.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量供电电压偏差: GB/T 12325—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [22] 刘健, 黄炜. 分布式光伏电源与负荷分布接近条件下的可接入容量分析[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 299-306.
- LIU Jian, HUANG Wei. Analysis on grid-connectable capacity of distributed PV generation in case of PV generation distribution close to load distribution[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 299-306.
- [23] 肖峻, 祖国强, 白冠男, 等. 配电系统安全域的数学定义与存在性证明[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4828-4836, 5106.
- XIAO Jun, ZU Guoqiang, BAI Guannan, et al. Mathematical definition and existence proof of distribution system security region[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4828-4836, 5106.
- [24] 刘佳, 程浩忠, 李思韬, 等. 兼顾供电能力和安全裕度的智能配电网协调运行优化方法[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3532-3538.
- LIU Jia, CHENG Haozhong, LI Sitao, et al. Coordinated operation optimization method for smart distribution system considering total supply capability and security margin[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3532-3538.
- [25] 赵海洲, 陈建凯, 杨海跃, 等. 考虑传输能力的含分布式电源配电网扩展规划方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 70-77.
- ZHAO Haizhou, CHEN Jiankai, YANG Haiyue, et al. Expansion planning method of distribution network with distributed generation considering transmission capacity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 70-77.

作者简介:

肖峻(1971—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为智能配电系统的规划与运行(E-mail: xiaojun@tju.edu.cn);

王传奇(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为智能配电系统的规划与运行(E-mail: wlegend@tju.edu.cn);

李晓辉(1973—),男,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为智能配用电、电力计量技术等(E-mail: lixiaohui_tj@sina.com)。

(编辑 王锦秀)

Calculation method and analysis application of DG total accommodation capability curve for urban distribution network

XIAO Jun¹, WANG Chuanqi¹, LI Xiaohui²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Marketing Service Center of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300202, China)

Abstract: In order to completely describe the distributed generation (DG) accommodation capability of urban distribution network and explore the improvement measures of DG total accommodation capability (TAC) curve, a calculation method of DG TAC curve of urban distribution network is proposed. The security region and security boundary are introduced. A TAC curve model considering actual situation of feeder load and voltage constraints is established, which uses the daily load curve to determine the state space, and obtains TAC curve through voltage verification of boundary points. A case verifies the effectiveness of the proposed method. By analyzing the load influencing factors of TAC curve, it is found that TAC curve is only influenced by the downstream load of bottleneck feeder section (group), and two TAC curve improvement measures of increasing the downstream load of bottleneck feeder section (group) and expanding the capacity of bottleneck feeder section (group) are proposed. The application methods of TAC curve in the aspects of guiding DG and load connection and conductor replacement are proposed.

Key words: urban distribution network; DG; TAC curve; daily load curve; bottleneck feeder section (group)

(上接第 151 页 continued from page 151)

Hybrid interlinking transformer and its fault blocking coordination control for microgrid

YIN Xin¹, LAI Jinmu², YIN Xianggen³, WANG Yaoqiang², YIN Yue², HU Jiaxuan³

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the interconnection and optimization operation of AC/DC hybrid microgrid (HMG), the conventional power-frequency transformer does not have the ability to block short-circuit faults and comprehensively voltage control. To solve this problem, a hybrid interlinking transformer (HIT) suitable for HMG is proposed, and the novel HMG based on HIT (HIT-HMG) is constructed. The typology structure and the operating principle of HIT are introduced. The novel three-limb three-winding power-frequency transformer is constructed to transform voltage level and transmit power, and achieves HMG voltage and current active control via the series converter. The mathematical models of the HIT and the series converter are built. The equivalent magnetic circuit and equivalent electrical circuit models are established. With considering of different fault locations and fault types of distribution network, a fault blocking coordination control strategy for the proposed HIT-HMG is proposed. The simulation and experiment are carried out to verify the proposed HIT and control strategy. The results show that, the impact of medium and high voltage distribution network faults on the HMG can be isolated by controlling the series winding voltage of HIT.

Key words: AC/DC hybrid microgrid; power-frequency transformer; electric converters; fault blocking; coordination control

附录 A 近似电压偏移计算方法

图 A1 是计算近似电压偏移的配电网结构。

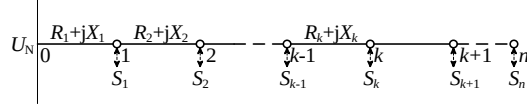


图 A1 计算近似电压偏移配电网结构

Fig.A1 Distribution network structure for calculating approximate voltage deviation

假设配电网电压近似为额定电压 U_N ，图 B1 中节点 k 的近似电压偏移见式(A1)，式(A1)计算的电压偏移较准确值偏大。

$$\Delta U_k \% = \frac{100 \left[\sum_{i=1}^k \left(R_i \sum_{k=i}^n S_k \cos \varphi_k + X_i \sum_{k=i}^n S_k \sin \varphi_k \right) \right]}{U_N^2}$$

$$= a_{k,1} S_1 + a_{k,2} S_2 + \dots + a_{k,k} S_k + \dots + a_{k,n} S_n \quad (A1)$$

其中，各项系数见式(A2)。

$$a_{k,m} = \begin{cases} \frac{100 \left(\sum_{i=1}^k R_i \cos \varphi + \sum_{i=1}^k X_i \sin \varphi \right)}{U_N^2} & k \leq m \\ a_{m,m} & k > m \end{cases} \quad (A2)$$

一般的，实际电网中各节点的功率因数只在很小的范围内变化，因此在计算近似电压偏移时可以采用固定功率因数。式(A2)表示的各项系数成为固定系数。

综上，某一工作点的各节点的近似电压偏移可以用矩阵形式表示，见式(A3)。

$$\Delta \mathbf{U}_i \% = \mathbf{A}_u \times \mathbf{W}_i \quad (A3)$$

式中： $\mathbf{A}_u$ 为电压偏移系数矩阵，其中元素由式(A2)确定。

附录 B 日负荷曲线

图 B1 是 L_1 — L_4 的日负荷曲线（场景 0）。

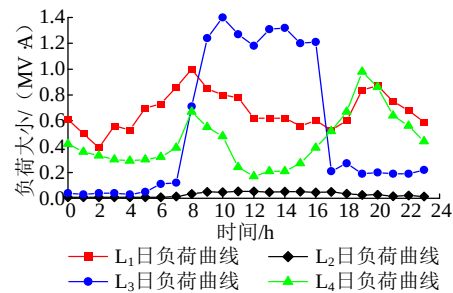


图 B1 L_1 — L_4 的日负荷曲线
Fig.B1 Daily load curves of L_1 - L_4

图 B2 是瓶颈馈线段上游负荷 L_1 和瓶颈馈线段下游负荷 L_3 、 L_4 及其削峰填谷情况。

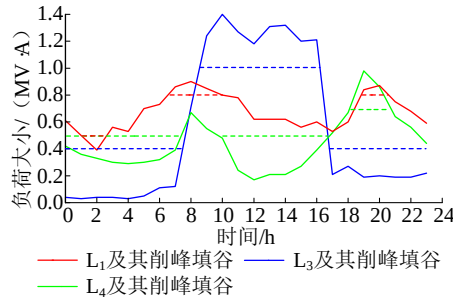


图 B2 L_1 、 L_3 、 L_4 及其削峰填谷情况
Fig.B2 Peak clipping and valley filling of L_1 , L_3 and L_4