

基于深度回收机制的专用用户接入费和使用费研究

江岳文, 钱佳琦

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 为了合理评估专用工程对配电网的成本影响, 需要分析深度回收机制下的接入费和使用费。专用供电工程的接入费主要是针对因用户接入造成的网络扩容时间提前而产生的成本; 使用费主要是针对因用户接入造成网络网损增加而产生的成本。提出利用雅可比矩阵推导得到含有环网的配电网节点边际容量成本矩阵, 并利用该矩阵计算分析深度回收机制下的用户接入费; 利用配电网节点网损灵敏度, 研究在深度回收机制下的专用工程使用费。算例分析验证了所提方法的有效性。

关键词: 专用工程; 配电网; 接入费; 使用费; 深度回收; 节点边际容量成本; 节点网损灵敏度

中图分类号: TM 71

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.07.013

0 引言

随着社会的发展、负荷的增加, 一些大用户往往通过专用线路从配电网某节点引入, 形成了专用供电工程, 即电网企业利用专用设施为特定用户提供供电服务的工程。专用工程接入配电网后, 必然会对配电网造成一系列影响, 如对网络中的潮流、电能质量^[1]、可靠性水平^[2]、网损产生影响, 致使供电设备剩余可传输容量减少^[3], 引起配电网扩建、新建提前^[4], 增加了配电网的扩容成本和网损成本。专用工程接入配电网所增加的配电网容量成本称为接入费。使用费则为专用工程接入配电网后增加的电网运行维护成本, 主要为增加的网损成本。如果专用工程收费仅以本工程的容量投资成本和运行成本作为费用收取依据, 则为浅度回收机制; 如果收费不仅考虑本工程的成本, 还考虑其对上级配电网容量投资和运行的影响造成的成本, 则为深度回收机制^[5-6]。在浅度回收机制下, 只需要根据工程本身的造价、电气参数和负荷参数等即可确定该工程自身的投资成本和运行维护成本。在深度回收机制下, 专用工程对上级配电网影响所产生的扩容成本和网损成本的确定需要考虑整个配电网的网络拓扑、负荷参数、可靠性要求等, 评估比较复杂。目前, 对用户收费采用深度回收机制的研究领域相对空白。本文提出利用节点边际容量成本(LMCC)探讨基于深度回收机制的专用用户接入费, 利用配电网节点网损灵敏度的变化探讨基于深度回收机制下的专用用户使用费。

节点边际容量成本目前在分布式电源规划^[7-8]、配电网规划^[9]中都已有一定的应用。但文献[7-9]中

的节点边际容量成本推导都是基于辐射状配电网, 对于环形配电网, 由于无法形成离散的0-1变量道路矩阵^[10], 不能根据道路矩阵判别节点负荷增加对支路电流的影响, 进而无法形成节点边际容量成本矩阵。文献[4]也考虑辐射状配电网中接入电动汽车引起新建、扩建容量成本。随着负荷的增加、配电网电压等级的提高及分布式电源的引入, 配电网将逐渐发展成为多分布式电源、多环网的电网^[11-12]。因此, 本文详细推导复杂配电网的节点边际容量成本矩阵, 充分考虑到配电网线路电阻与电抗接近特性, 分析专用工程接入配电网后对配电网投资成本的影响, 从而为深度回收机制下的专用用户收取容量成本提供依据。

在分析专用用户接入配电网的网损成本时, 不仅需要分析由于专用用户接入后自身承担的网损变化, 还需研究由于其接入配电网导致其他节点增加的网损灵敏度的变化, 为专用工程接入配电网的经济性评估提供参考。本文在文献[13]的基础上, 鉴于配电网运行参数特性, 详细推导配电网网损灵敏度矩阵, 通过灵敏度矩阵分析网损变化。

通过合理地评估专用用户对所接入配电网的投资成本和运行成本的影响, 可以为专用用户接入费、使用费收费机制以及输电定价提供理论指导, 减少用户之间的交叉补贴。同时, 能为电力建设市场提供合理的成本信号, 促进配电网建设主体多元化发展。

1 专用工程接入配电网接入费评估

1.1 支路功率边际容量成本

设配电网中支路 h 的承载极限功率为 S_h^w , 现节点 k 接入一专用工程, 增加 ΔS_k 的负荷, 引起支路 h 上增加的功率为 ΔS_h 。假定扩容措施为增加同型号的线路或变压器, 则可通过式(1)计算扩容时间 T_2 。

收稿日期: 2015-04-08; 修回日期: 2016-02-22

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2013J01176)

Project supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province(2013J01176)

$$(S_h + \Delta S_h)(1 + u_i)^{T_2} = S_h^{\text{up}} \quad (1)$$

其中, S_h 为目前负荷水平在支路 h 中的潮流功率; u_i 为负荷自然增长率。

假设节点 k 没有增加负荷, 维持配电网原始运行状态, 根据负荷的自然增长, 式(1)可以表示为:

$$S_h(1 + u_i)^{T_1} = S_h^{\text{up}} \quad (2)$$

设支路 h 的投资为 M_h , 则因为节点 k 新增专用工程负荷 ΔS_k 而引起的现值成本的变化为:

$$\Delta C_h = \frac{M_h}{(1+r)^{T_2}} - \frac{M_h}{(1+r)^{T_1}} = C_{h^*} - C_h \quad (3)$$

其中, r 为折现率。

通过式(3)可以计算支路 h 上增加单位功率而增加的投资成本 C_{USCh} 为:

$$C_{\text{USCh}} = \frac{\Delta C_h}{\Delta S_h} \quad (4)$$

当 $\Delta S_h \rightarrow 0$ 时:

$$C_{\text{USCh}} = \frac{\partial C_h}{\partial S_h} \quad (5)$$

将投资成本等额折算到年值, 则支路 h 上每增加单位负荷的年投资成本 C_{YUSCh} 为:

$$C_{\text{YUSCh}} = \frac{\partial C_h}{\partial S_h} \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \quad (6)$$

其中, y 为设备使用的年限。

结合式(3)—(6), 可得式(7)如下:

$$C_{\text{YUSCh}} = \frac{M_h \ln(1+r)}{S_h(1+r) \frac{\ln(S_h^{\text{up}}/S_h)}{\ln(1+u_i)}} \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \quad (7)$$

式(7)反映了配电网支路功率变化而引起的成本变化, 即支路功率边际容量成本(BPMCC)。

1.2 节点功率对支路潮流灵敏度

已知配电网支路 ij 潮流方程如下所示:

$$P_{ij} = U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - U_i^2 G_{ij} \quad (8)$$

$$Q_{ij} = U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + U_i^2 B_{ij} \quad (9)$$

其中, P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为支路 ij 上的有功潮流和无功潮流; U_i 、 U_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压模值; θ_{ij} 为支路 ij 上的电压相角差; G_{ij} 、 B_{ij} 为导纳矩阵中的相应元素。

在配电网中, 由于支路的 R 和 X 相差不大, 故有功潮流不仅与电压的相位角有关, 而且与各节点电压大小相关, 无功潮流同样既受到电压相位角的影响, 也受到电压大小的影响, 即 $P_{ij} = f(\theta_i, \theta_j, U_i, U_j)$ 、 $Q_{ij} = f(\theta_i, \theta_j, U_i, U_j)$ 。根据多变量函数全微分定义可知:

$$\begin{cases} \Delta P_{ij} = \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \frac{\partial P_{ij}}{\partial U_i} \Delta U_i + \frac{\partial P_{ij}}{\partial U_j} \Delta U_j \\ \Delta Q_{ij} = \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial U_i} \Delta U_i + \frac{\partial Q_{ij}}{\partial U_j} \Delta U_j \end{cases} \quad (10)$$

对式(10)求导, 可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} = U_i U_j (-G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = -H_{ij} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} = U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = H_{ij} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial U_i} = U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - 2U_i G_{ij} = \frac{N_{ij}}{U_i} - 2U_i G_{ij} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial U_j} = U_i (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = \frac{N_{ij}}{U_j} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} = U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = -J_{ij} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} = -U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = J_{ij} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial U_i} = U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + 2U_i B_{ij} = \frac{L_{ij}}{U_i} + 2U_i B_{ij} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial U_j} = U_i (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = \frac{L_{ij}}{U_j} \end{cases} \quad (11)$$

其中, H_{ij} 、 N_{ij} 、 J_{ij} 、 L_{ij} 为用极坐标表示的雅可比矩阵中的元素。根据式(10)—(12)可以形成:

$$\begin{cases} \Delta P_{ij} = -H_{ij} \Delta \theta_i + H_{ij} \Delta \theta_j + \left(\frac{N_{ij}}{U_i} - 2U_i G_{ij} \right) \Delta U_i + \frac{N_{ij}}{U_j} \Delta U_j \\ \Delta Q_{ij} = J_{ij} \Delta \theta_i - J_{ij} \Delta \theta_j + \left(\frac{L_{ij}}{U_i} + 2U_i B_{ij} \right) \Delta U_i + \frac{L_{ij}}{U_j} \Delta U_j \end{cases} \quad (13)$$

已知用极坐标表示的雅可比矩阵的潮流求解方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (14)$$

对上式求逆可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (15)$$

根据式(11)—(13)和式(15), 形成支路功率变化与节点功率变化的矩阵:

$$\begin{cases} [\Delta P_b] = (\Delta P_{ij})_{m \times 1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_b}{\partial \theta} & \frac{\partial P_b}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} \frac{\partial P_b}{\partial \theta} & \frac{\partial P_b}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \\ [\Delta Q_b] = (\Delta Q_{ij})_{m \times 1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_b}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_b}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_b}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_b}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $[\Delta P_b] = (\Delta P_{ij})_{m \times 1}$ 为有功支路潮流增量矩阵; $[\Delta Q_b] = (\Delta Q_{ij})_{m \times 1}$ 为无功支路潮流增量矩阵; $[\Delta \theta] = (\Delta \theta_i)_{(n-1) \times 1}$ 为除平衡节点外其他节点的电压相位角增量矩阵; $[\Delta U] = (\Delta U_i)_{(n-1) \times 1}$ 为除平衡节点外其他节点的电压模值大小增量矩阵; $[\Delta P] = (\Delta P_i)_{(n-1) \times 1}$ 为除平衡节点外其他节点的有功功率增量矩阵; $[\Delta Q] = (-\Delta Q_i)_{(n-1) \times 1}$ 为除平衡节点外其他节点的无功功率增量矩阵; m 为配电网的支路数; n 为配电网的节点数; ΔP_i 、 ΔQ_i 分别为节点 i 的有功和无功增量。在不

考虑其他节点负荷变化的情况下,仅节点 k 增加 $\Delta P_k + j\Delta Q_k$ 的负荷,则 $[\Delta P]$ 、 $[\Delta Q]$ 中对应于除节点 k 外的其他元素皆为零。

假设节点 k 增加的负荷功率因数为 $\cos\varphi_k$,则根据式(16),可以得出节点 k 功率对支路 h 潮流变化方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_h = r_{hk,PP}\Delta P_k + r_{hk,PQ}\Delta P_k \tan\varphi_k \\ \Delta Q_h = r_{hk,QP}\Delta P_k + r_{hk,QQ}\Delta P_k \tan\varphi_k \end{cases} \quad (17)$$

$$\Delta S_h = \sqrt{(r_{hk,PP} + r_{hk,PQ}\tan\varphi_k)^2 + (r_{hk,QP} + r_{hk,QQ}\tan\varphi_k)^2} \Delta P_k \quad (18)$$

式(18)中当 $\Delta P_k \rightarrow 0$ 时, ΔS_h 也将趋近于 0,可得节点 k 的负荷变化对支路 h 功率变化的灵敏度 r_{hk} 为:

$$r_{hk} = \frac{\partial S_h}{\partial S_k} = \cos\varphi_k \times \sqrt{(r_{hk,PP} + r_{hk,PQ}\tan\varphi_k)^2 + (r_{hk,QP} + r_{hk,QQ}\tan\varphi_k)^2} \quad (19)$$

其中, $r_{hk,PP}$ 、 $r_{hk,PQ}$ 、 $r_{hk,QP}$ 、 $r_{hk,QQ}$ 为式(16)中相关矩阵元素。

通过式(19)即可以获得节点 k 有功功率和无功功率的变化引起各条支路潮流的变化率,为节点边际容量成本的求取提供依据。

1.3 复杂配电网节点边际容量成本获取

设 $C_{LMCC,0}$ 为配电网原始负荷状态下的支路-节点边际容量成本矩阵,该矩阵的维数为 $m \times (n-1)$ 。 $C_{LMCC,hk,0}$ 表示 $C_{LMCC,0}$ 中节点 k 对支路 h 的边际容量成本。

根据式(19),节点 k 负荷在支路 h 上的边际容量成本为:

$$C_{LMCC,hk,0} = r_{hk} C_{YUSCh} \quad (20)$$

根据式(16),节点 k 负荷变化将引起多条支路上功率的变化,因此节点 k 的边际容量成本为:

$$C_{LMCC,hk,0} = \sum_{h=1}^m r_{hk} C_{YUSCh} \quad (21)$$

如果专用工程接入点越靠近配电网末端,就需要占用越多的线路为该用户传输功率,必定会产生更多的扩容成本。

当接入用户功率较小时,对配电网的各方面影响较小,仅考虑用户接入节点 k 的边际容量成本即可。则该用户应缴纳的年深度扩容成本接入费为:

$$C_{U1} = S_U C_{LMCC,k,0} \quad (22)$$

其中, S_U 为接入工程的负荷功率。

当接入用户功率较大时,根据上述过程,可以获得用户接入后电网的支路-节点边际容量矩阵 $C_{LMCC,1}$ 。接入前后各支路-节点边际容量成本变化矩阵 ΔC_{LMCC} 为:

$$\Delta C_{LMCC} = C_{LMCC,1} - C_{LMCC,0} \quad (23)$$

分析深度扩容成本时,应考虑该节点负荷变化

对整个配电网其他节点的边际容量成本的影响而产生的成本,即:

$$C_{U2} = S_U \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{h=1}^m \Delta C_{LMCC,hj} \quad (24)$$

因此,大功率用户每年应缴纳的接入费 C_U 应为二者的和,即:

$$C_U = C_{U1} + C_{U2} \quad (25)$$

2 专用工程接入配电网使用费用评估

系统总的有功网损可以看作是各节点注入有功功率的代数和^[14],即:

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) \quad (26)$$

由于 $B_{ij} = B_{ji}$ 、 $\sin\theta_{ij} = -\sin\theta_{ji}$,故:

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_i U_j G_{ij} \cos\theta_{ij} \quad (27)$$

将 P_L 展开,可得:

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_i U_j G_{ij} \cos\theta_{ij} + \sum_{j=1}^n U_k U_j G_{kj} \cos\theta_{kj} + \sum_{i=1}^n U_i U_k G_{ik} \cos\theta_{ik} + U_k^2 G_{kk} \quad (28)$$

从式(28)可以看出,系统有功功率损耗与母线电压模值和相角有关系。假设节点 k 有专用用户接入,接入功率为 ΔP_k 、 ΔQ_k 。由于该节点功率的变化引起该母线上电压 U_k 及角度 θ_k 发生变化,假设其他节点不变,则网损变化量 ΔP_{LOSS} 为:

$$\Delta P_{LOSS} = \frac{\partial P_L}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial P_L}{\partial U_k} \Delta U_k \quad (29)$$

式(29)中, $\frac{\partial P_L}{\partial \theta_k}$ 求解过程如下:

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_k} = - \sum_{j=1}^n U_k U_j G_{kj} \sin\theta_{kj} + \sum_{i=1}^n U_i U_k G_{ki} \sin\theta_{ki} \quad (30)$$

由于 $\sin\theta_{kk}=0$,故式(30)可以进一步化简为:

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_k} = 2 \sum_{i=1}^n U_i U_k G_{ik} \sin\theta_{ik} \quad (31)$$

式(29)中, $\frac{\partial P_L}{\partial U_k}$ 求解过程如下:

$$\frac{\partial P_L}{\partial U_k} = 2 \sum_{i=1}^n U_i G_{ik} \cos\theta_{ik} + 2 U_k G_{kk} \quad (32)$$

由于 $\cos\theta_{kk}=1$,故式(32)可以进一步化简为:

$$\frac{\partial P_L}{\partial U_k} = 2 \sum_{i=1}^n U_i G_{ik} \cos\theta_{ik} \quad (33)$$

根据式(14)和(15),将式(29)写成矩阵形式,则:

$$\Delta P_{LOSS} = [\Delta \theta \quad \Delta U] \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial U} \end{bmatrix} =$$

$$[\Delta P \ \Delta Q] \left(\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}^T \right)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial U} \end{bmatrix} \quad (34)$$

根据式(34),可以得到节点功率对网损灵敏度的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}^T \right)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial U} \end{bmatrix} \quad (35)$$

其中, P 、 Q 分别为除平衡节点外的各节点有功和无功功率矩阵。

如果配电网中只有节点 k 接入专用工程负荷, 负荷大小为 $\Delta P_k + j\Delta Q_k$, 则专用工程在该节点新增分摊负荷引起的网损为:

$$\Delta P_{\text{LOSS}} = \begin{bmatrix} r_{k, \text{LP}\theta} & r_{k, \text{LP}U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \sum_{i=1}^n U_i U_k G_{ik} \sin \theta_{ik} \\ 2 \sum_{i=1}^n U_i G_{ik} \cos \theta_{ik} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{k, \text{LQ}\theta} & r_{k, \text{LQ}U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \sum_{i=1}^n U_i U_k G_{ik} \sin \theta_{ik} \\ 2 \sum_{i=1}^n U_i G_{ik} \cos \theta_{ik} \end{bmatrix} \quad (36)$$

其中, $r_{k, \text{LP}\theta}$ 、 $r_{k, \text{LP}U}$ 、 $r_{k, \text{LQ}\theta}$ 、 $r_{k, \text{LQ}U}$ 为式(35)中与节点 k 相关矩阵元素。

根据式(36), 该用户接入配电网后, 应该承担的年网损费用与节点网损灵敏度的关系为:

$$C_{\text{LOSSI}} = \lambda \tau_{\text{max}} \left\{ \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{\partial P_{\text{LB}}}{\partial P_j} - \frac{\partial P_{\text{LF}}}{\partial P_j} \right) P_j + \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{\partial P_{\text{LB}}}{\partial Q_j} - \frac{\partial P_{\text{LF}}}{\partial Q_j} \right) Q_j + \Delta P_L \right\} \quad (37)$$

其中, λ 为电能价格 (元/(kW·h)); τ_{max} 为最大负荷损耗时间; P_{LB} 为专用工程接入后的配电网网损; P_{LF} 为专用工程接入前的配电网网损。

3 算例分析

以 IEEE 33 节点配电系统作为测试算例, 网络接线如图 1 所示。该系统含有 32 条支路和 2 条联络线 (图中虚线所示), 假设联络线开关在运行的过

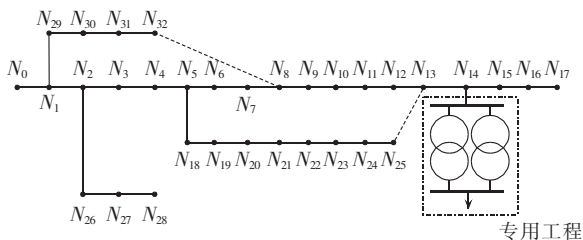


图 1 IEEE 33 节点配电系统

Fig.1 IEEE 33-bus distribution system

程中都为闭合状态, 线路选用 LGJ 架空线路。有 1 个专用用户接入工程, 其接入线路长度为 2.63 km, 全线采用电缆, 专用工程负荷容量为 800 kW·A, 2 台配变容量各自为 400 kW·A, 专用工程负荷功率因数 $\cos \varphi = 0.92$, $\tau_{\text{max}} = 3750 \text{ h}$, $\lambda = 0.46 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。假设该配电网负荷以每年 3% 的自然增长速度增长, 折现率为 8%, 线路投资回报年限为 40 a。根据深度回收机制, 分析专用工程用户每年应缴纳的接入费用和使用费用。

3.1 专用工程接入费用分析

(1) 不同容量专用工程接入配电网后各节点边际容量成本及年接入费计算。

假设有 2 个专用工程的容量分别为 100 kW·A 和 800 kW·A, 接入点为 N_{14} 。图 2 反映了专用工程接入前后配电网各节点边际容量成本的变化。

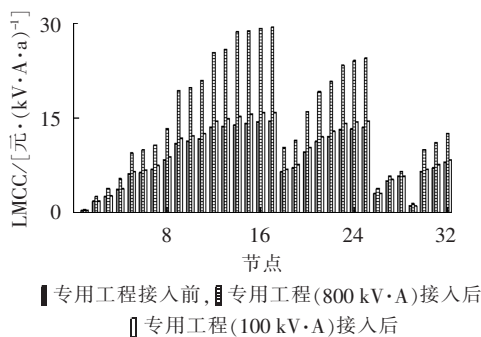


图 2 专用工程接入前后 LMCC

Fig.2 Comparison of nodal LMCC between with and without special user

从图 2 可以看出, 无论是在专用工程接入前还是后, 节点 N_{17} 由于处在网络末端, 需要占用最多的线路为该节点用户传输功率, 因此拥有最大的节点边际容量成本。在专用工程接入前该节点边际容量成本为 14.5 元/(kW·A·a), 专用工程 (800 kW·A) 接入后则为 29.3 元/(kW·A·a)。相比, 节点 N_1 负荷仅占用一条线路为其传输功率, 故拥有最小的节点边际容量成本, 专用工程 (800 kW·A) 接入前后分别仅为 0.43 元/(kW·A·a) 和 0.57 元/(kW·A·a)。因此, 为了减少接入费用, 用户可尽量选择网络首端附近节点作为接入点。

从图 2 可以看出, 100 kW·A 的专用工程接入对配电网各节点边际容量成本的影响远小于 800 kW·A 的专用工程接入后的影响。100 kW·A 的专用工程接入导致节点 N_{14} 边际容易成本增幅仅为 10.6%, 其他各节点的节点边际容易成本增幅都小于此值, 即小容量专用用户的接入对配网节点边际容量成本影响比较小, 因此可只根据式(22)计算用户每年需要缴纳的接入费。

800 kW·A 的专用工程接入, 使 N_{14} 的边际容量成

本由 13.921 元/(kV·A·a)变为 28.599 元/(kV·A·a)。根据式(22),则该用户应该收取的年接入费用为 1.11 万元/a;根据式(25),则该用户应该收取的接入费用为 16.52 万元/a,两者相差较大。主要原因是该专用工程负荷较大,导致全网大量节点边际容量成本大幅度上升。除了与 N_{14} 没有在同一树枝上的 N_{26} 、 N_{27} 和 N_{28} 节点边际容量成本基本没有变化外,其他支路的潮流都随着节点 N_{14} 负荷的增加而增加,支路扩容时间提前,节点边际容量成本都有较大的增加。增幅最大的节点为 N_{14} 及其下游节点 N_{15} — N_{17} ,基本达到 100%。为了体现接入费用收取的公平性,则该专用工程(800 kV·A)的用户应该承担各节点边际容量成本上升导致的接入费用的增加,有利于电网回收投资。如果每个专用工程接入费用仅根据接入点边际容量成本的变化而支付费用,必然使得其他承担该专用工程潮流的支路无法回收扩容成本。

(2)同一时间段专用工程接入先后顺序不同对各节点边际容量成本及接入费用的影响。

为了探讨专用工程接入顺序的不同是否对 2 个工程接入费用产生明显影响,从而引起接入工程费用分摊的不公,本文以 2 个专用工程接入顺序为例进行分析。假设有 2 个专用工程,容量都为 800 kV·A,分别从节点 N_{10} 和 N_{14} 接入。设原始配电网的节点边际容量成本为 $C_{LMCC,0}$,专用工程接入后的节点边际容量成本变化差值为与 $C_{LMCC,0}$ 相减得到。本文考虑以下 3 种情况下节点边际容量成本的变化:专用工程用户从节点 N_{14} 接入,接入后全网节点边际容量成本为 $C_{LMCC,1}$,此时引起的全网节点边际容量成本的变化差值为 $\Delta C_{LMCC,1}$;在同一时间段有 2 个专用工程在节点 N_{14} 和 N_{10} 接入,接入后全网节点边际容量成本为 $C_{LMCC,2}$,此时引起的全网节点边际容量成本的变化差值为 $\Delta C_{LMCC,2}$;仅有一个专用工程从 N_{10} 接入配电网,接入后全网节点边际容量成本为 $C_{LMCC,3}$,此时引起的全网节点边际容量成本的变化差值为 $\Delta C_{LMCC,3}$ 。

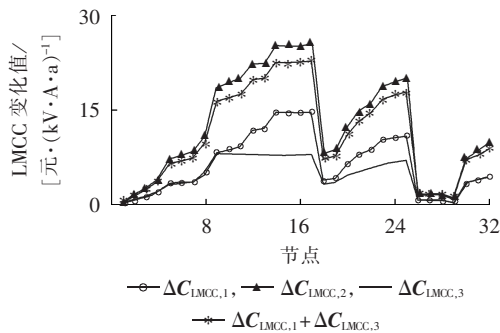


图 3 不同专用工程接入后 LMCC 的变化差值

Fig.3 Comparison of nodal LMCC change among different special users

从图 3 可看出,专用工程用户分别单独接入配电网引起的节点边际容量成本变化之和(即 $\Delta C_{LMCC,1} + \Delta C_{LMCC,3}$)与两者同时接入引起的节点边际容量成本变化($\Delta C_{LMCC,2}$)规律一致,前者数值略小于后者。节点边际容量成本最大偏差为节点边际容量成本的 6.57%。因此,对于同一时间段接入不同节点的专用工程,其接入费用可以分别采用独立接入计算获得。该方法既可以减少接入费用分摊的交叉补贴,也提供了明确清晰的接入费用收费依据,且能合理回收电网投资。

如果专用工程接入点不在同一树枝上,如 2 个专用用户分别从 N_{28} 和 N_{14} 接入,各自引起的节点边际容量成本变化之和 $\Delta C_{LMCC,4}$ 与同时接入引起的节点边际容量成本变化 $\Delta C_{LMCC,5}$ 数值基本一致,节点边际容量成本最大偏差为节点边际容量成本的 1.51%。可见接入点不在同一树枝上的专用工程独立计算各自的接入费几乎不引起交叉费用。

(3)不同时间段专用工程接入对各节点边际容量成本及接入费用影响。

假设有一专用工程容量为 800 kV·A,现从 N_{14} 接入,此时的节点边际容量成本为 $C_{LMCC,6}$ 。随着负荷的自然增长,6 a 后该配电网节点边际容量成本为 $C_{LMCC,7}$ 。则 $C_{LMCC,6}$ 与 $C_{LMCC,7}$ 大小见图 4。从图中可以看出,随着时间的推移,负荷的自然增长,电网节点边际容量成本越来越大。

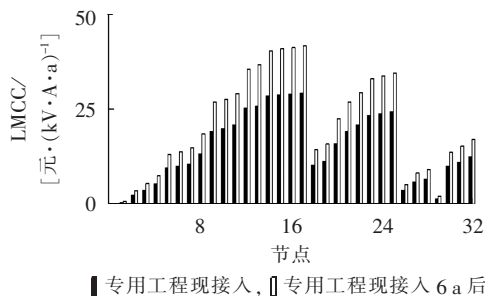


图 4 时间推移对 LMCC 的影响

Fig.4 Comparison of nodal LMCC between different connection times

有两专用工程,容量皆为 800 kV·A。现假设:某一专用工程现在接入配电网 N_{10} ,接入后节点边际容量成本为 $C_{LMCC,8}$,则 $\Delta C_{LMCC,8} = C_{LMCC,8} - C_{LMCC,0}$;某一专用工程现从 N_{14} 接入,6 a 后配电网节点边际容量成本为 $C_{LMCC,9}$,此时另一专用工程从 N_{10} 接入,接入后节点边际容量成本为 $C_{LMCC,10}$,则 $\Delta C_{LMCC,9} = C_{LMCC,10} - C_{LMCC,9}$ 。 $\Delta C_{LMCC,8}$ 与 $\Delta C_{LMCC,9}$ 见图 5。根据图 4 和图 5 所示,如果跨时段比较长,后续专用工程的接入将引起更大的节点边际容量成本变化,即后续用户需要缴纳更多的年接入费用。由于专用工程接入时间不一,先接入电网需缴纳接入费用,后接入电网则后交接入费用。如专用工程现在从 N_{10} 接入,需要缴纳

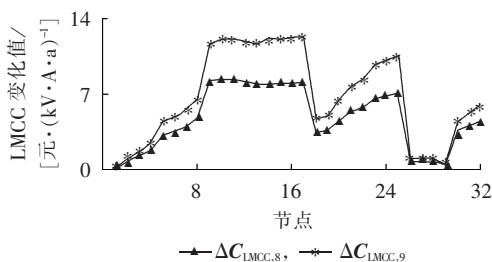


图 5 不同时间专用工程接入后 LMCC 的变化差值

Fig.5 Comparison of nodal LMCC change between different connection times

的年接入费用为 13.0 万元/a;如果该专用工程 6 a 后从 N_{10} 接入,则 6 a 后年接入费用为 20.4 万元/a,折算成现值费用,为 12.86 万元/a。可见二者比较接近,这也证明了利用节点边际容量成本计算接入费用的合理性。

如果时间跨度比较小(如几个月或 1 a),则时间顺序对工程接入费用基本没有影响。

3.2 专用工程使用费分析

(1)专用工程接入前后网损灵敏度的变化及年使用费计算。

现假设有一个专用工程从 N_{14} 引入,专用工程接入容量为 $800 \text{ kV}\cdot\text{A}$ 。则接入前后各节点有功网损灵敏度和无功网损灵敏度的值见图 6。

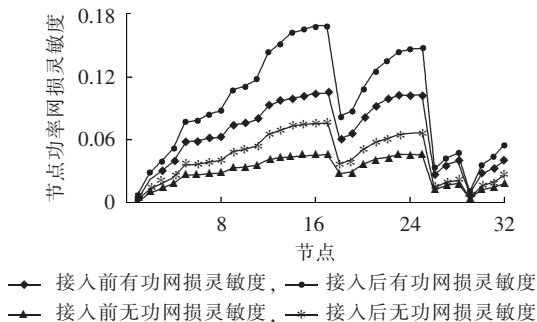


图 6 专用工程接入前后网损灵敏度的变化

Fig.6 Comparison of nodal active and reactive loss sensitivities between with and without special user

从图 6 可以看出,专用工程接入电网后各节点有功和无功网损灵敏度都有增加。有功网损和无功网损灵敏度的增幅规律一致。除与 N_{14} 没有在同一树枝上的 N_{26} 、 N_{27} 、 N_{28} 节点网损灵敏度变化比例幅度较小外,其他节点网损灵敏度都有较大幅度的增加,如节点 N_{14} 自身有功网损灵敏度增加了 62.3%,在 N_{14} 附近的其他节点增幅也达到 40%~60%。根据式(37),该专用用户应该缴纳的年使用费为 19.2 万元/a,因为其接入导致配电网网损增加 111.554 kW,该专用工程接入前全网网损为 152.675 kW,接入后网损增加了近 73%。如果仅根据接入前该节点网损灵敏度变化即 ΔP_L 计算使用费,则只需 11.34 万元/a。

(2)同一时间段专用工程接入先后顺序不同对

各节点网损灵敏度及年使用费影响。

如果 2 个工程在同一时间段接入,根据 3.1 节的分析,2 个专用工程各自的使用费可以通过分别独立接入进行计算,那么对于网损灵敏度的影响是否具有同样类似的规律?本文采用 3.1 节中的方法,设原始配电网各节点有功网损灵敏度矩阵为 $S_{p,0}$,无功网损灵敏度矩阵为 $S_{q,0}$,专用工程容量均为 $800 \text{ kV}\cdot\text{A}$,专用工程节点网损灵敏度的变化差值为与 $S_{p,0}$ 、 $S_{q,0}$ 相减得到。考虑以下 3 种情况下各节点网损灵敏度的变化:专用工程用户从 N_{14} 接入,接入后全网各节点有功、无功网损灵敏度为 $S_{p,1}$ 、 $S_{q,1}$,变化差值为 $\Delta S_{p,1}$ 、 $\Delta S_{q,1}$;在同一时间段有 2 个专用工程在 N_{14} 和 N_{10} 接入,接入后全网各节点有功、无功网损灵敏度为 $S_{p,2}$ 、 $S_{q,2}$,变化差值为 $\Delta S_{p,2}$ 、 $\Delta S_{q,2}$;仅有一个专用工程从 N_{10} 接入配电网,接入后全网各节点有功、无功网损灵敏度为 $S_{p,3}$ 、 $S_{q,3}$,变化差值为 $\Delta S_{p,3}$ 、 $\Delta S_{q,3}$ 。从图 7 可得 2 个专用工程分别接入引起的 $\Delta S_{p,1} + \Delta S_{p,3}$ 和同时接入引起的 $\Delta S_{p,2}$ 相差很小,其中在节点 N_{14} 偏差最大,也仅为该节点有功网损灵敏度的 3.92%。同理,接入顺序的变化对无功网损灵敏度偏差影响也很小,最大偏差节点 N_{14} 为该节点无功网损灵敏度的 4.76%。因此,在计算专用工程年使用费时,可以采取分别独立接入电网进行网损费用的计算,既能合理回收电网运行费用,又能减少网损交叉补贴费用。

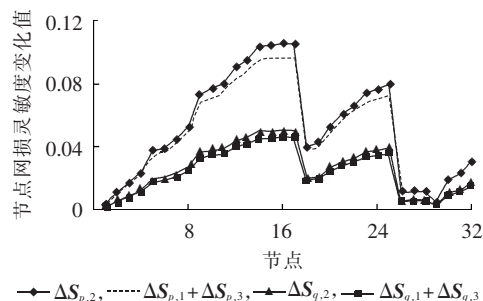


图 7 不同专用工程接入后各节点网损灵敏度的变化差值

Fig.7 Comparison of nodal active and reactive loss sensitivity change among different special users

(3)不同时间段专用工程接入对各节点网损灵敏度及年使用费影响。

有两专用工程,容量皆为 $800 \text{ kV}\cdot\text{A}$ 。现假设:某一专用工程现在接入配电网 N_{10} 后各节点有功、无功网损灵敏度分别为 $S_{p,4}$ 、 $S_{q,4}$,记 $S_{p,4}$ 、 $S_{q,4}$ 分别与 $S_{p,0}$ 、 $S_{q,0}$ 的差值为 $\Delta S_{p,4}$ 、 $\Delta S_{q,4}$;某一专用工程现在从节点 N_{14} 接入,6 a 后配电网各节点有功、无功网损灵敏度分别为 $S_{p,5}$ 、 $S_{q,5}$,此时另一专用工程从 N_{10} 接入,各节点有功、无功网损灵敏度分别为 $S_{p,6}$ 、 $S_{q,6}$,记 $S_{p,6}$ 、 $S_{q,6}$ 分别与 $S_{p,5}$ 、 $S_{q,5}$ 的差值为 $\Delta S_{p,5}$ 、 $\Delta S_{q,5}$ 。

从图 8 可以看出,由于负荷的自然增长、新用户的不断接入,系统各节点网损灵敏度逐渐增加,专用工程在不同时间点接入,如果跨时较长,则对各节点网损灵敏度影响是不一致的,即引起的网损变化量是不一样的。如果专用工程现在从 N_{10} 接入,则应该缴纳的年使用费用为 14.47 万元/a;6 a 后从 N_{10} 接入,需缴纳的年使用费用为 23.56 万元/a,折算成现值费用为 14.85 万元/a,二者比较接近,说明本文方法计算专用工程使用费的合理性。

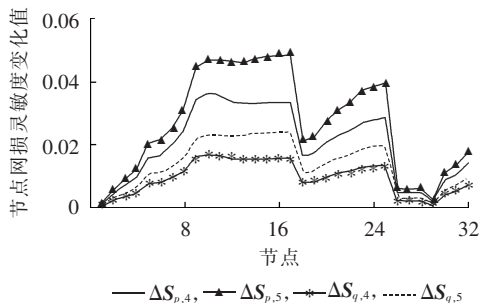


图 8 不同时间专用工程接入后各节点网损灵敏度的变化差值

Fig.8 Comparison of nodal active and reactive loss sensitivity change between different connection times

4 结论

本文对专用工程接入配电网的深度收费机制进行研究,详细推导了如何利用节点边际容量成本和节点网损灵敏度分析专用工程的接入费和使用费。具体研究内容如下。

(1)基于目前仅对辐射式配电网的节点边际容量成本进行研究的不足,提出采用雅可比矩阵详细推导含有环网的配电网节点边际容量成本矩阵。

(2)分析了容量比值较小和较大专用用户接入配电网的接入费用收取机制。容量比值较小的用户由于对配电网中各节点边际容量成本改变较小,可以根据其接入配电网节点边际容量成本直接收取接入费;容量比值较大的专用用户则需考虑全网各节点边际容量成本的变化而收取接入费用。

(3)推导基于雅可比矩阵的配电网网损灵敏度矩阵,并分析基于网损灵敏度的专用用户接入工程使用费用收取机制。

(4)通过 IEEE 33 节点配电系统作为测试算例,详细分析了多专用工程接入配电网各种情况下节点边际容量成本变化规律、网损灵敏度变化规律及量化专用用户深度收费费用,进行了年使用费和运行费用量化分析等。

专用用户深度收费机制的研究有利于引导电力资源的合理使用;能减少不同节点负荷之间分摊投资费用和运行费用的交叉补贴现象;有助于配电网

投资成本的回收,确保配电网投资的资金来源,促进其发展。

参考文献:

- [1] 刘书铭,李琼林,陈栋新,等. 中高压配电网非线性用户的电能质量特性研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(15):150-155.
LIU Shuming,LI Qionglin,CHEN Dongxin,et al. Study of power quality characteristics of nonlinear electric user in medium-high voltage distribution networks[J]. Power System Protection and Control,2012,40(15):150-155.
- [2] 李蕊,李跃,苏剑,等. 配电网重要电力用户停电损失及应急策略[J]. 电网技术,2011,35(10):170-176.
LI Rui,LI Yue,SU Jian,et al. Power supply interruption cost of important power consumers in distribution network and its emergency management[J]. Power System Technology,2011,35(10):170-176.
- [3] LI F,TOLLEY D L. Long-run incremental cost pricing based on unused capacity[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(4):1683-1689.
- [4] 杜爱虎,胡泽春,宋永华,等. 考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]. 电网技术,2011,35(11):35-42.
DU Aihu,HU Zechun,SONG Yonghua,et al. Distribution network planning considering layout optimization of electric vehicle charging stations[J]. Power System Technology,2011,35(11):35-42.
- [5] 杨娟. 发达国家用户接入电网的费用分摊方式及其启示[J]. 价格理论与实践,2011(8):47-48.
YANG Juan. The share and enlightenment for access cost of load in developed countries[J]. Price theory and Practice,2011(8):47-48.
- [6] 刘树杰,杨娟. 规范“居民用户接入费”问题研究[J]. 中国物价,2012(2):18-22.
LIU Shujie,YANG Juan. The research on access cost of resident load[J]. China Price,2012(2):18-22.
- [7] 欧阳武,程浩忠,张秀彬. 基于配电网节点边际容量成本的分布式电源规划[J]. 电力系统自动化,2009,33(18):28-31.
OUYANG Wu,CHENG Haozhong,ZHANG Xiubin. Distributed generation planning method based on locational marginal capacity cost in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(18):28-31.
- [8] 任龙霞,雷金勇,甘德强. 计及配电网节点/支路边际容量成本的分布式电源规划[J]. 电力系统自动化,2010,34(21):34-39.
REN Longxia,LEI Jinyong,GAN Deqiang. Distributed generator planning in distribution network considering locational/branch marginal capacity cost model[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(21):34-39.
- [9] 欧阳武,程浩忠,张秀彬,等. 配电网节点边际容量成本及应用[J]. 电力系统自动化,2009,33(1):18-21.
OUYANG Wu,CHENG Haozhong,ZHANG Xiubin,et al. Research on locational marginal capacity cost in distribution network and its application[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(1):18-21.
- [10] 李红伟,王敬章,张安安. 一种含分布式发电系统的三相配电网潮流直接算法[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):67-70.
LI Hongwei,WANG Jingzhang,ZHANG Anan. Direct algorithm of three-phase power flow for radial distribution network with DGs[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):67-70.

[11] 孟晓芳,刘文宇,朴在林,等. 基于网络拓扑分析的配电网潮流节点分析法[J]. 电网技术,2010,34(4):140-145.
MENG Xiaofang,LIU Wenyu,PIAO Zailin,et al. A nodal analysis method of load flow in distribution network based on network topology analysis[J]. Power System Technology,2010,34(4): 140-145.

[12] 杨雄,卫志农,孙国强,等. 含分布式电源的配电网三相解耦潮流计算方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):99-107.
YANG Xiong,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Decoupled three-phase power flow calculation for distribution network with DGs[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3): 99-107.

[13] 陈恳,李小锐,徐敏. 网损微增率新解法与转置雅可比矩阵法用于有功优化计算的比较[J]. 中国电机工程学报,2000,20(7):34-36.
CHEN Ken,LI Xiaorui,XU Min. Com parisons between new

method and transposed Jacobian matrix method for calculating incremental transmission losses in active power economic dispatch[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(7):34-36.

[14] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社,2007.

作者简介:



江岳文

江岳文(1977—),女,湖南岳阳人,副教授,博士,研究方向为风电并网优化运行、电力系统优化运行(E-mail:jiangyuewen2008@163.com);
钱佳琦(1991—),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要研究方向为含分布式电源的配电网规划(E-mail:n130127020@fzu.edu.cn)。

Connection fee and use fee based on deep recovery mechanism for special user
JIANG Yuewen,QIAN Jiaqi

(College of Electrical Engineering and Automation,Fuzhou University,Fuzhou 350108,China)

Abstract: In order to rationally evaluate the impact of special user on the cost of distribution network,its connection fee and use fee on deep recovery mechanism are analyzed. The connection fee is the cost mainly caused by the premature network expansion due to the connection of special user and the use fee is the cost mainly caused by the network loss increase due to the connection of special user. Jacobi matrix is used to deduce the nodal marginal capacity cost matrix of distribution network with loop configuration for calculating the connection fee of special user on deep recovery mechanism. The nodal loss sensitivity of distribution network is used to research the use fee of special user on deep recovery mechanism. Case analysis verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: specialized project; distribution network; connection fee; use fee; deep recovery; nodal marginal capacity cost; nodal loss sensitivity

(上接第 81 页 continued from page 81)

Load model calibration based on calibration navigator
for wide-area power system

HAO Lili¹,YUE Haoyong²,WANG Haohao³

(1. School of Automation & Electrical Engineering,Nanjing University of Technology,Nanjing 211816,China;
2. State Grid Nanjing Power Supply Company,Nanjing 210019,China;3. NARI Group Corporation
(State Grid Electric Power Research Institute),Nanjing 211106,China)

Abstract: Based on the analysis of power-angle stability margin sensitivity to the load parameters of different nodes in system dominant mode,a calibration navigator is proposed for the load model of wide-area power system to distinguish the dominant calibration areas and parameters of system load model and analyze the stability clustering characteristics of load nodes. The law of dominant calibration area distribution and its influencing factors are discussed based on the static and dynamic load ratio parameters and initial load powers,which shows that,the dominant calibration area distribution depends mainly on the location of disturbance and the active power of nodal load. Its correctness is verified by simulation and practical example. A unified scheme of load model calibration for wide-area power system is proposed to improve its efficiency and accuracy,which selects the dominant calibration areas first,classifies their load nodes,and calibrates the load nodes of same type with the same model parameters.

Key words: calibration navigator; wide-area power system; load model; dominant calibration area; dominant calibration parameter; load classification