第48卷 第21期 2024年11月10日
DOI：10.7500/AEPS20240202004
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 48 No. 21 Nov. 10，2024

基于通信负载站间迁移的配电网与5G基站日前互动运行方法

刘 洪[1]，王志杰[1]，徐正阳[1,2]，杨白洁[1]，李俊锴[1]，张世达[1]
（1. 智能电网教育部重点实验室（天津大学），天津市 300072；2. 天津大学佐治亚理工深圳学院，广东省深圳市 518055）

摘要： 当前，将5G基站作为灵活性资源参与电网互动的研究多关注于5G基站储能资源的利用，忽视了5G基站通信负载的调节潜力。为此，提出了一种基于通信负载站间迁移的配电网运营商（DNO）与移动网络运营商（MNO）日前互动运行方法。首先，构建了DNO-MNO双层互动运行优化模型，其中，DNO是综合考虑系统网损成本与5G基站激励成本的激励策略，并以系统$N-1$安全运行准则为约束，以系统总运行成本最低为目标；MNO综合考虑5G基站功耗成本与电网需求响应收益，并以5G基站净运行成本最低为目标制定5G基站功率运行方案。其次，针对下层MNO 5G基站调度模型存在非凸、非线性约束难以解析求解的问题，提出了一种基于可行域迭代的算法以实现对模型的精确求解。再次，提出了基于精英遗传算法的DNO内嵌MNO双层互动模型求解算法。最后，通过算例验证了文中所提方法的有效性和实用性。

关键词： 配电网；5G基站；通信负载；需求响应；可行域

0 引言

随着新型电力系统构建的逐步深入，终端电气化程度不断提升，以5G基站为代表的新型用电负荷激增。数据显示，预计2030年将有816万座5G基站投建并运行[1-2]。激增的用电负荷导致城市配电网供电压力加大，相较于4G技术，5G通信拥有更高的带宽与更低的延时，但也由于采用大规模天线阵列装置与更高的通信频段，导致5G基站功耗大幅提高，单站功耗约为4G基站的3至4倍[3-4]，移动网络运营商（mobile network operator，MNO）面临高昂的5G基站运营成本。上述背景下，一方面，城市配电网亟须激励灵活性资源需求响应以提高现有设备的利用效率[5]；另一方面，5G基站作为配电网内的一种灵活性资源，也亟须转变传统运行方式以降低总运行成本。因此，如何促进配电网与5G基站之间的协同互动，实现双方的互利共赢具有重要实际意义。

目前，关于5G基站与电网协同互动的研究取得了一定成果，考虑到本文的研究对象为5G基站，下文将5G基站简称为基站。文献[6]构建了含规模化基站与共享储能系统的主动配电网混合博弈框架，通过基站储能参与配电网与储能运营的合作实现与电网的互动。文献[7]提出将基站负荷纳入虚拟电厂（virtual power plant，VPP）范畴，通过基站储能电池参与VPP统一调度的方式减轻城市配电网的供电压力。文献[8]构建了基站储能调节潜力评估模型，通过将基站储能租赁给配电网的方式参与电网需求响应。文献[9]提出了基于基站储能电池需求响应的配电网运营商（distribution network operator，DNO）与MNO的Stackelberg博弈协同优化方法，在降低基站用能成本的同时，也能为配电网提供灵活性资源。文献[10]提出了基于负荷准线的基站储能常态化参与电网互动的激励机制，在降低基站运行成本的同时，促进了电网新能源消纳。上述有关基站参与电网互动的研究着重探索了基站备用储能资源的利用。事实上，考虑到基站部署密集、信号范围重叠覆盖等特征，基站的通信负载调节特性同样具备巨大的灵活性潜力。

目前，有关基站通信负载调节特性的研究在通信领域取得了一定进展。文献[11-12]研究了在轻负载网络场景中，不影响用户通信服务质量（quality of service，QoS）的前提下，通过轻载站休眠以提升基站整体的能源利用效率。文献[13]提出利用深度Q网络进行5G资源分配，通过提高5G资源利用效率的方式降低基站的总用能成本。文献[14]面向未来活跃售电市场中配电网节点电价的差异性，提出

收稿日期：2024-02-02；修回日期：2024-05-25。
上网日期：2024-08-28。
新型电力系统运行与控制全国重点实验室开放基金课题（SKLD23KM15）；广东省基础与应用基础研究基金资助项目（2022A1515110896）。

将通信负载从高电价基站迁移至低电价基站以降低整体的用能成本。文献[15]进一步考虑基站配套设备的影响，构建了一种大规模基站网络能量管理模型，实现基站通信负载与配套设备的协调优化。上述有关基站负载调节特性的研究主要面向基站侧的降本节能，若将此调节特性作为一种灵活性资源参与电网互动，则可以有效挖掘基站负载调节特性的价值潜力。

由于在实际通信场景中，基站最首要的功能是按照QoS标准向用户提供可靠的通信服务，而MNO调度基站参与电网互动极大地改变了基站的内在运行模式，可能导致用户QoS受损。因此，基站调度模型有必要考虑每一个用户的QoS约束。然而，由于基站间功率相互耦合，并且规模化通信网络场景中包含大量的表示通信连接关系的0-1变量，使得模型呈现非凸、非线性特征，极大增加了模型的求解难度。

综上所述，考虑目前研究进展和存在的技术难点，本文提出一种基于通信负载站间迁移的配电网与基站日前互动运行方法。首先，构建DNO-MNO双层互动运行优化模型。其中，DNO综合考虑网损成本与基站激励成本，以系统$N-1$安全运行准则为约束，以系统总运行成本最低为目标优化基站激励策略；MNO考虑基站与用户的运行约束，在保障通信用户QoS的前提下，以基站净运行成本最低为目标，优化基站功率运行方案。其次，针对下层MNO基站调度模型存在非凸、非线性约束难以解析求解的问题，提出将模型分解为以基站与通信用户为主体的双层优化模型，并提出一种基于可行域迭代的算法实现对模型的精确求解。然后，提出基于精英遗传算法的DNO内嵌MNO双层互动模型求解算法。最后，通过算例对本文所提方法进行验证。

1　DNO-MNO双层互动运行模型

1.1　模型整体框架

基于通信负载站间迁移的配电网与基站日前互动运行模型框架包含上层DNO与下层MNO两个主体。图1为互动运行模型整体框架。

上层DNO为解决城市电网系统不满足$N-1$安全运行准则的问题，制定馈线间差异化的基站功率补贴系数以引导不同区域内基站的用能行为，从而改善馈线的负荷特性。

下层MNO拥有基站的调度权，并且由于基站最首要的功能是按照QoS标准向通信用户提供可靠的通信服务，故MNO调度基站首先要保障通信

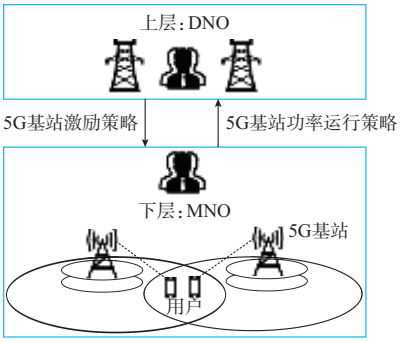

图1　互动运行模型整体框架

Fig. 1　Overall framework of interactive operation model

用户QoS不受损害。在此基础上，MNO根据电网针对基站的激励策略，以基站净运行成本最低为目标制定基站功率运行方案。DNO与MNO为互动博弈关系，即通过基站激励策略与基站功率运行策略的交互迭代确定最终的协同运行方案。

1.2　DNO优化模型

DNO考虑系统$N-1$安全运行准则约束，以网损成本与基站激励成本之和的总运行成本最低为目标，优化针对基站的功率激励策略，即针对不同时段不同馈线制定最优的基站功率补贴系数。

1）目标函数

$$\min\ (C_{\text{loss}}+C_{\text{dr}}) \tag{1}$$

$$C_{\text{loss}}=C_{\text{L}}\sum_{t\in T}\sum_{mn\in\Omega}I_{mn,t}^{2}r_{mn}\Delta t \tag{2}$$

$$C_{\text{dr}}=\sum_{t\in T}\sum_{r\in R}\sum_{i\in N_r}k_{r,t}g_{i,t}^{\text{dr}} \tag{3}$$

$$g_{i,t}^{\text{dr}}=P_{i,t,0}-P_{i,t}^{\text{tr}} \tag{4}$$

式中：C_{loss}和C_{dr}分别为系统网损和基站激励成本，其中，C_{dr}与基站响应功率与基站功率补贴系数有关；i为基站的编号索引；T为调度时段集合；$g_{i,t}^{\text{dr}}$为t时段基站i的响应功率，可以通过基站的基准动态发射功率与参与响应后的实际动态发射功率依据式(4)计算得出；$P_{i,t,0}$为t时段基站i的基准动态发射功率，各基站的动态发射功率基准值由MNO在不考虑功率补贴收益的前提下，以基站群总功耗成本最低为目标优化得出；$P_{i,t}^{\text{tr}}$为t时段基站i参与电网响应后的实际动态发射功率；$k_{r,t}$为t时段馈线r内基站功率补贴系数，为DNO模型的决策变量；C_{L}为网络损耗成本系数；$I_{mn,t}$为t时段支路mn电流的有效值；r_{mn}为支路mn的电阻值；Ω为电网支路集合；R为馈线段集合；N_r为与馈线r连接的基站集合；Δt为时段变化量。

2）约束条件

DNO运行约束包括潮流约束、节点电压约束、支路电流约束、系统$N-1$安全运行准则约束等。

(1)潮流约束

$$P_{m,t}=\sum_{n\in C_m}\alpha_{mn}[G_{mn}V_{m,t}^2-V_{m,t}V_{n,t}(G_{mn}\cos\delta_{mn,t}+B_{mn}\sin\delta_{mn,t})] \quad (5)$$

$$Q_{m,t}=\sum_{n\in C_m}\alpha_{mn}[-B_{mn}V_{m,t}^2+V_{m,t}V_{n,t}(B_{mn}\cos\delta_{mn,t}-G_{mn}\sin\delta_{mn,t})] \quad (6)$$

式中：$V_{m,t}$和$V_{n,t}$分别为t时段节点m和节点n的电压；G_{mn}和B_{mn}分别为支路mn的电导和电纳；$\delta_{mn,t}$为t时段支路mn的电压相角差；C_m为与节点m相连的所有节点集合；$P_{m,t}$、$Q_{m,t}$分别为t时段节点m注入的有功、无功功率；α_{mn}为线路开断状态。

(2)节点电压约束

配电网中节点电压应满足上、下限约束，即

$$V_m^{\min}\leqslant V_{m,t}\leqslant V_m^{\max} \quad (7)$$

式中：$V_m^{\max}$、$V_m^{\min}$分别为节点m处电压的上、下限。

(3)支路电流约束

由于线路传输容量的限制，支路传输电流需要满足一定的约束条件，即

$$I_{mn,t}<I_{mn}^{\max} \quad (8)$$

式中：$I_{mn}^{\max}$为流经支路mn的电流上限值。

(4)系统$N-1$安全运行准则约束

系统$N-1$安全运行准则设置了各条馈线的负载率上限，在满足$N-1$安全运行准则的前提下，即使线路的最上游区域出现较严重的单一元件故障，系统也具有充足的转供裕度支撑一整条线路的全部转供。因此，满足$N-1$安全运行准则实际上为配电系统提供了有力的供电可靠性支撑。传统$N-1$安全运行准则约束要求配电网中任意一条馈线的最大负载率小于该种接线模式下负载率的上限[16]，如式(9)所示。

$$\eta_{r\max}=\frac{W_{r\max}}{L_{\max}\cos\varphi} \quad (9)$$

$$\eta_{r\max}\leqslant\varepsilon \quad (10)$$

式中：$W_{r\max}$为第r条馈线的负荷需求峰值；$L_{\max}$为馈线最大传输容量；$\cos\varphi$为功率因数；ε为线路负载率上限，与线路的接线形式有关，单联络接线模式中$\varepsilon=50\%$；$\eta_{r\max}$为第r条馈线的峰值负载率。

1.3　MNO优化模型

由于在基站群中，部分基站部署在不同的馈线供电区域，故基站间的功率补贴系数并不相同。MNO则利用基站间功率补贴系数的差异，通过基站的站间协作与负载迁移，在保障通信用户QoS的前提下，降低补贴系数较高区域内基站的发射功率以获取较高的功率补贴收益。但是，参与互动可能导致基站群总功耗成本的提升，故MNO的基站功率运行方案应该控制使考虑功耗成本与功率补贴收益后的基站净运行成本最低。

1)目标函数

$$\min\ (C_{\mathrm{BS}}-C_{\mathrm{dr}}) \quad (11)$$

$$C_{\mathrm{BS}}=C_{\mathrm{p}}\sum_{i\in I}\sum_{t\in T}P_{i,t}^{\mathrm{B}} \quad (12)$$

式中：C_{BS}为基站总功耗成本；C_{p}为基站用电电价；$P_{i,t}^{\mathrm{B}}$为t时段基站i的整体功耗；I为基站集合。

2)约束条件

MNO运行约束包括基站功率运行约束、通信用户连接关系约束、基站带宽约束、信道传输约束、通信用户QoS约束等。

(1)基站功率运行约束

基站总功率由静态功率与动态发射功率两部分组成[17]，其中，静态功率为固定值、动态发射功率需要满足上下限约束，即

$$P_{i,t}^{\mathrm{B}}=P_{i,t}^{\mathrm{S}}+\beta P_{i,t}^{\mathrm{tr}} \quad (13)$$

$$0\leqslant P_{i,t}^{\mathrm{tr}}\leqslant P^{\max} \quad (14)$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{S}}$为t时段基站i的静态功率；β为能量效率系数，为功率放大器效率的倒数；$P^{\max}$为动态发射功率上限。

(2)通信用户连接关系约束

通信用户同一时刻仅可与一座基站建立通信连接关系[18]，即

$$\sum_{i\in I}x_{i,j,t}=1 \quad (15)$$

式中：$x_{i,j,t}$为表示t时段基站i与通信用户j的通信连接关系的0-1变量，值为0表示未建立连接、值为1表示建立连接。

(3)基站带宽约束

基站所供通信用户的带宽需求之和不允许超过基站的最大工作带宽，即

$$\sum_{j\in J_i}x_{i,j,t}W_0\leqslant W^{\max} \quad (16)$$

式中：W_0为通信用户的带宽需求；$W^{\max}$为基站最大工作带宽；J_i为基站i所供的通信用户集合。

(4)信道传输约束

$$\varphi_{i,j,t}=\frac{g_{i,j}P_{i,t}^{\mathrm{tr}}}{\sum\limits_{y\neq i,y\in I}g_{y,j}P_{y,t}^{\mathrm{tr}}+\sigma^2} \quad (17)$$

$$g_{i,j}=\begin{cases}A\left(\dfrac{d_{i,j}}{d_0}\right)^{-\alpha} & d_{i,j}\geqslant d_0\\ A & 0\leqslant d_{i,j}<d_0\end{cases} \quad (18)$$

式中：$\varphi_{i,j,t}$为t时段基站i与通信用户j的信噪比；A为固定路径损耗值；σ为噪声功率；α为路径损耗指数；$g_{i,j}$为基站i与通信用户j的信道增益，其与路径

损耗相关；$d_{i,j}$为基站i与通信用户j之间的距离；d_0为本文所设置的参考距离。

当基站i与通信用户j之间的距离$d_{i,j}$小于参考距离d_0($d_0>0$)时，信道增益为固定路径损耗值A[19]。

(5)通信用户QoS约束

本文将通信用户的信号接收速率表征为用户QoS[20]。

$$R_{i,j,t}=W_0\log_2(1+\varphi_{i,j,t}) \tag{19}$$

$$R_{i,j,t}\geqslant R_{j,t}^{\mathrm{req}}x_{i,j,t} \tag{20}$$

式中：$R_{i,j,t}$为t时段基站i与用户j间的信号传输速率；$R_{j,t}^{\mathrm{req}}$为t时段通信用户j的QoS基本需求。

2　MNO优化模型求解

2.1　MNO模型求解分析

MNO调度基站参与电网互动需要对各个基站的发射功率进行决策，但由于用户QoS约束中基站间的功率相互耦合，并且包含大量表示通信连接关系的0-1变量，使得MNO基站调度模型整体呈现出非凸、非线性特征，难以通过解析求解的方式进行优化[21]。因此，结合下层MNO基站调度模型特征与求解难点，将原模型分解为以基站与通信用户为主体的双层优化模型。模型求解框架如附录A图A1所示。

首先，构建用户层模型，在实际通信场景中，用户设备根据QoS的优劣匹配基站QoS。因此，用户层模型以QoS最优为目标，从而决策通信连接关系。约束条件考虑用户QoS需求约束、通信连接关系约束、信道传输约束、最大带宽限制约束等。

$$\max_{x_{i,j,t}}\sum_{j\in J}W_0x_{i,j,t}\log_2\left(\frac{g_{i,j}P_{i,t}^{\mathrm{tr}}}{\sum\limits_{y\neq i,y\in I}g_{y,j}P_{y,t}^{\mathrm{tr}}+\sigma^2}\right) \tag{21}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}R_{i,j,t}\geqslant R_{j,t}^{\mathrm{req}}\\ \text{式(15)—式(20)}\end{cases} \tag{22}$$

式中：J为区域内所有通信用户集合。

其次，基站层模型以基站净运行成本最小为目标，从而优化基站发射功率。约束条件考虑基站功率运行约束、用户QoS需求约束等。

$$\begin{cases}\min\limits_{P_{i,t}^{\mathrm{tr}}}\ C_{\mathrm{BS}}-C_{\mathrm{dr}}\\ \text{s.t.}\quad \text{式(13)—式(14)}\\ \qquad W_0\log_2\left(1+\dfrac{g_{i,j}P_{i,t}^{\mathrm{tr}}}{\sum\limits_{y\neq i,y\in I}g_{y,j}P_{y,t}^{\mathrm{tr}}+\sigma^2}\right)\geqslant R_{j,t}^{\mathrm{req}}x_{i,j,t}\end{cases} \tag{23}$$

2.2　MNO模型求解

在上述MNO基站调度模型分解的基础上，将基站层策略的最优性条件写进用户层模型约束，进而，将原MNO基站调度模型改写为式(24)的形式。

$$\begin{cases}\max\limits_{X}\ \sum\limits_{j\in J}W_0x_{i,j,t}\log_2\left(1+\dfrac{g_{i,j}P_{i,t}^{\mathrm{tr}}}{\sum\limits_{y\neq i,y\in I}g_{y,j}P_{y,t}^{\mathrm{tr}}+\sigma^2}\right)\\ \text{s.t.}\quad P_{i,t}^{\mathrm{tr}}\in\arg\min(C_{\mathrm{BS}}-C_{\mathrm{dr}})\\ \qquad \text{式(13)—式(20)}\end{cases} \tag{24}$$

为便于后续模型的求解，针对基站层与用户层策略集作如下定义。

$$\mathcal{N}=\{x_{i,1,t},x_{i,2,t},\cdots,x_{i,j,t}\} \tag{25}$$

$$\mathcal{M}=\{P_{1,t}^{\mathrm{tr}},P_{2,t}^{\mathrm{tr}},\cdots,P_{i,t}^{\mathrm{tr}}\} \tag{26}$$

$$\begin{cases}X_t=\{x_{i,1,t},x_{i,2,t},\cdots,x_{i,j,t}\}\\ \text{s.t.}\quad \text{式(15)—式(20)}\end{cases} \tag{27}$$

$$\begin{cases}P_t^{\mathrm{tr}}=\{P_{1,t}^{\mathrm{tr}},P_{2,t}^{\mathrm{tr}},\cdots,P_{i,t}^{\mathrm{tr}}\}\\ \text{s.t.}\quad \text{式(13)—式(14)，式(18)—式(20)}\end{cases} \tag{28}$$

式中：$\mathcal{N}$和$\mathcal{M}$分别为用户层和基站层各调度时段内的可行策略集合；X_t和P_t^{tr}分别为用户层和基站层各调度时段内的可行策略集合，集合内基站与通信用户策略均满足基站与通信用户各自的运行约束。

在此基础上，定义基站与通信用户可行策略集合分别为：

$$\mathcal{X}=\{X_1,X_2,\cdots,X_t,\cdots,X_T\} \tag{29}$$

$$\mathcal{Y}=\{P_1^{\mathrm{tr}},P_2^{\mathrm{tr}},\cdots,P_t^{\mathrm{tr}},\cdots,P_T^{\mathrm{tr}}\} \tag{30}$$

式中：$\mathcal{X}$和$\mathcal{Y}$分别为用户层和基站层全调度时段内的可行策略集合。

式(24)可推导为式(31)。

$$\begin{cases}\max\limits_{\mathcal{N}}\ \phi_1\\ \text{s.t.}\quad \mathcal{M}\in\arg\max\phi_{\mathrm{f}}(\mathcal{N},\mathcal{M})\\ \qquad \text{式(13)—式(14)}\end{cases} \tag{31}$$

式中：ϕ_1、ϕ_{f}分别为用户层、基站层目标函数。

$$\phi_1=\sum_{j\in J}W_0x_{i,j,t}\log_2\left(1+\frac{g_{i,j}P_{i,t}^{\mathrm{tr}}}{\sum\limits_{y\neq i,y\in I}g_{y,j}P_{y,t}^{\mathrm{tr}}+\sigma^2}\right) \tag{32}$$

$$\phi_{\mathrm{f}}(\mathcal{N},\mathcal{M})=C_{\mathrm{dr}}-C_{\mathrm{BS}} \tag{33}$$

将由基站与通信用户共同构成的可行组合策略称为双向可行策略，双向可行策略解空间称为双向可行域，式(34)和式(35)为双向可行域的数学定义式。

$$\Theta(\mathcal{M})=\{\mathcal{N}\}\qquad \mathcal{N}\in\mathcal{X},\mathcal{M}\in\mathcal{Y} \tag{34}$$

$$\Pi=\{(\mathcal{N},\mathcal{M})\}\qquad \mathcal{N}\in\Theta(\mathcal{M}),\mathcal{M}\backslash\text{式(13)—式(14)} \tag{35}$$

定义可行域后，式(31)可进一步推导如下：

$$\max_{\mathcal{N}} \ \phi_{\mathrm{l}}(\mathcal{N},\mathcal{M}) \tag{36}$$

$$\text{s.t.} \ \ (\mathcal{N},\mathcal{M})\in\Pi \tag{37}$$

$$\phi_{\mathrm{f}}(\mathcal{N},\mathcal{M})\geqslant\phi_{\mathrm{f}}(\mathcal{N},\hat{\mathcal{M}}) \qquad \hat{\mathcal{M}}\in B \tag{38}$$

式中：B为基站可行域内全体策略集合；$\hat{\mathcal{M}}$为基站可行域内的任一策略。

式(37)将基站与通信用户的组合策略限制在双向可行域内，式(38)表示固定用户层策略$\mathcal{N}$后，基站层策略集合$\mathcal{M}$为可行域内的最优策略。

经过一系列转化，最终将下层MNO基站调度模型改写为式(36)—式(38)。不难发现，模型仍然难以直接求解。因此，提出一种基于可行域迭代的算法。首先，将可行域内全体策略集合B压缩，从而实现对式(38)的放松；其次，可采用商用求解器获得模型一组较优的双向可行策略对；然后，以双向可行策略对$(\mathcal{N}_{\mathrm{l}},\mathcal{M}_{\mathrm{l}})$中的通信用户策略$\mathcal{N}_{\mathrm{l}}$为边界条件，以基站层目标最优求解得到基站策略$\mathcal{M}_{\mathrm{f}}$，将$\mathcal{M}_{\mathrm{f}}$逐轮添加至$B$内；最终，伴随算法的不断迭代，在基站可行域空间$B$扩张的同时，式(38)被收紧直至得到模型的精确解。算法的求解原理如附录B图B1所示。

将式(38)放松后，模型如下：

$$\begin{cases}\text{式(36)—式(37)}\\ \phi_{\mathrm{f}}(\mathcal{N},\mathcal{M})\geqslant\phi_{\mathrm{f}}(\mathcal{N},\hat{\mathcal{M}}) \qquad \hat{\mathcal{M}}\in B_k\end{cases} \tag{39}$$

式中：B_k为基站可行域子空间。

设置B_k内部元素数目随算法迭代逐渐扩充，首轮迭代时设置其为空集。算法的求解流程如附录C所示，其具体求解步骤如下：

步骤1：初始$k=0$，B_0为空集，用户层目标ϕ_{l}的寻优上下界为正无穷与负无穷。

步骤2：计算所有用户与各基站欧氏距离，按照就近原则确定初始连接策略$\mathcal{N}_{\mathrm{l}0}$，将$\mathcal{N}_{\mathrm{l}0}$作为基站模型边界条件，并采用CPLEX商用求解器求解得到基站最优策略$\mathcal{M}_{\mathrm{f}0}$，将$\mathcal{M}_{\mathrm{f}0}$添加至$B_1$，令$k=1$，跳转至步骤4。

步骤3：更新用户下限$B_{k+1}^{\mathrm{L}}=B_k^{\mathrm{L}}$，执行步骤4。

步骤4：求解模型(37)得到双向可行策略$(\mathcal{N}_{\mathrm{l}k},\mathcal{M}_{\mathrm{l}k})$，更新用户上限$B_{k+1}^{\mathrm{U}}=\phi_{\mathrm{l}}(\mathcal{N}_{\mathrm{l}k},\mathcal{M}_{\mathrm{l}k})$，执行步骤5。

步骤5：固定用户层策略$\mathcal{N}_{\mathrm{f}k}$，采用CPLEX求解器以基站层目标最优求解得到基站层策略$\mathcal{M}_{\mathrm{f}k}$，并将其添加至$B_{k+1}$，执行步骤6。

步骤6：判断$\mathcal{M}_{\mathrm{f}k}$与$\mathcal{M}_{\mathrm{l}k}$是否相等，若$\mathcal{M}_{\mathrm{f}k}=\mathcal{M}_{\mathrm{l}k}$，则迭代结束并输出基站功率最优运行方案，否则执行步骤7。

步骤7：令$k=k+1$，判断$\phi_{\mathrm{l}}(\mathcal{N}_{\mathrm{l}k},\mathcal{M}_{\mathrm{l}k})$是否大于用户下限$B_k^{\mathrm{L}}$。若是，则跳转至步骤3，否则跳转至步骤4。

3　DNO内嵌MNO的双层互动模型求解

在DNO-MNO双层互动模型求解中，由于下层MNO模型为一个非线性、非凸性模型，无法寻找等效的Karush-Kuhn-Tucker(KKT)最优性条件。因此，解析式的双层模型求解方法无法应用。基于此，提出基于精英遗传算法(elitist selection genetic algorithm，ESGA)的DNO内嵌MNO双层互动模型求解算法[22]，算法求解流程如图2所示。

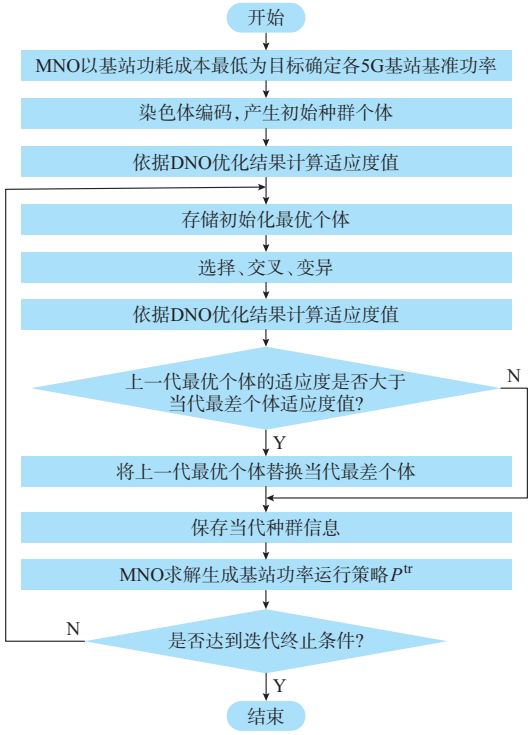

图2　DNO内嵌MNO双层互动模型求解流程图

Fig. 2　Flow chart of solution of DNO-embedded MNO dual-layer interactive model

由流程图可知，双层互动模型通过DNO与MNO的策略迭代实现求解。其中，DNO模型采用ESGA求解获得针对基站的功率激励策略，MNO模型采用基于可行域迭代的算法求解获得基站功率运行策略。当迭代满足预设收敛条件时，确定最终的互动运行方案。特别地，由式(4)可知，基站功率响应量的计算需要参考基站的基准功率，故DNO与MNO互动前，MNO需要以基站群功耗成本最低为目标确定各基站功率基准值。

4　算例分析

4.1　算例概况

典型单联络4馈线拓扑系统以及基站地理位置信息如附录D图D1所示，182座基站以300 m的间距部署在16 km^{2}的城市中心区域中[23]，将区域划分为4 000个小单元，任意一个小单元表示一个通信用户聚合点，通信用户位置符合泊松分布[24]。系统额定电压为10 kV，线路最大载流为400 A，线路阻抗参数可参考文献[25]。系统内除基站负荷外，包含工业、商业、行政、居民等典型负荷[16]。由于基站电价并非本文研究重点，故所有基站电价均为1.5元/(kW•h)。除特别声明外，通信参数设置如下：基站最大动态发射功率为10 kW[24]；固定路径损耗值$A=-35$ dB；路径损耗指数$\alpha=2.5$；参考距离$d_0=1$ m[19]；基站的最大工作带宽为100 MHz[26]；通信用户带宽需求$W_0=2$ MHz；噪声功率为10^{-9} W[27]；能量效率系数$\beta=2.815\ 7$[28]；通信用户QoS时序特性如附录E所示。

在上述算例背景下，设计如下2种对比场景：

Case1：配电网不考虑基站需求响应，即基站与配电网相互独立运行；

Case2：配电网考虑基站需求响应，即基站与配电网协同互动运行。

4.2　DNO与MNO互动运行效果分析

为探究DNO与MNO互动运行的影响，表1给出了Case1与Case2下DNO与MNO各类运行成本与指标的对比。对比结果表明，Case2比Case1的系统网损成本减少2 050.70元，这是由于考虑基站功率响应后，各条馈线负荷需求趋于均衡，进而改善了系统内的潮流分布。相比于Case1，MNO虽然在Case2的基站功耗成本增加了6 404.89元，但因参与电网互动而获得的功率补贴收益增加了6 575.14元。因此，与电网的互动运行降低了MNO的基站净运行成本。

表1　Case1与Case2下各类运行成本与指标对比

Fig. 1　Comparison of various operating costs and indicators in Case1 and Case2

Case	是否满足线路$N-1$安全准则	DNO网损成本/元	DNO基站激励成本/元	DNO总运行成本/元	MNO基站功耗成本/元	MNO基站净运行成本/元
1	否	8 640.15	0	8 640.15	17 814.56	17 814.56
2	是	6 589.45	6 575.14	12 164.59	23 855.45	17 280.31

图3展示了Case1与Case2下4条馈线的负荷时序特性曲线。图中：黑色虚线表示线路满足$N-1$安全运行准则的临界负载率。相较于Case1，Case2下各条馈线的负荷时序特性得到了有效改善。由于采用了单联络接线模式，故临界负载率取50%。由图3可知，Case1下馈线分别在01:00、15:00、16:00、17:00、23:00时发生越限，不满足系统$N-1$安全运行准则。而Case2下基站参与配电网需求响应，DNO通过制定差异化的基站功率补贴系数引导不同馈线区域内基站的用能行为，使得各条馈线的峰值负载降低到满足$N-1$安全运行准则的临界值。附录F图F1展示了DNO全时段内4条馈线针对基站功率补贴系数的优化结果。分析图中信息可知，各条馈线针对基站的功率补贴系数仅在越限时段为正，其他时段均为零。以典型时段(00:00—01:00)为例，此时馈线1发生越限，DNO为满足系统$N-1$安全运行准则，激励馈线1内基站降低发射功率，从而提高基站功率补贴系数。MNO在此激励信号引导下，通过基站间的通信负载迁移降低馈线1区域内基站的发射功率以获得电网的功率补贴收益。

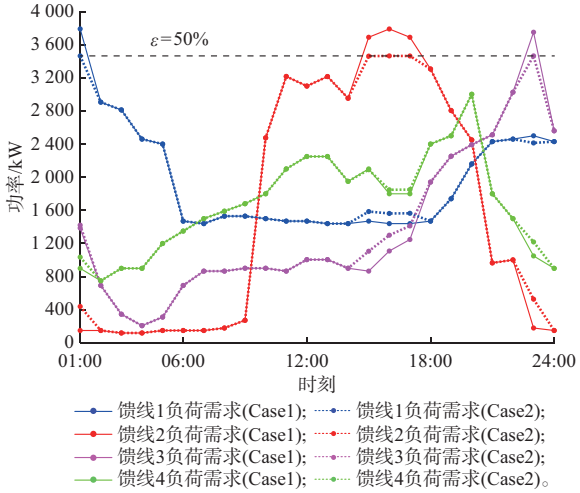

图3　各馈线负荷时序特性曲线

Fig. 3　Load time-sequence characteristic curve of each feeder

4.3　基站负载迁移特性分析

以典型时刻23:00为例，探究基站负载迁移特性。由图3负荷特性曲线可知，Case1下馈线1与馈线3此时处于负荷峰值时段，DNO提高馈线内基站功率补贴系数，激励馈线内基站下调发射功率；馈线

2与馈线4处于负荷谷值时段，DNO降低馈线内基站功率补贴系数，激励馈线内基站上调发射功率，Case1与Case2下全部基站功率分布柱状图见附录G。附录H图H1为4条馈线负荷需求的具体变化量。相较于Case1，Case2下4条馈线的负荷需求变化量分别为－93.1、353.9、－286.4、168.8 kW。计算可知，馈线1与馈线3内基站总功率下调379.5 kW，馈线2与馈线4内基站总功率上调522.7 kW，故基站参与电网需求响应后，系统内基站总功率提高了143.2 kW。

由信道传输约束（式(18)—式(19)）可知，基站信号由基站向通信用户传递过程中存在衰减，且基站与通信用户的通信距离越长，信号衰减程度越明显。Case1下MNO以基站总功耗成本最低为原则优化基站功率运行方案，其将引导通信用户就近与基站建立通信连接关系，平均通信距离达到理论最短。Case2下处于高负载馈线内的部分基站在电网激励下降低发射功率，但为保障通信用户QoS不受损害，部分非响应基站应提高发射功率以支撑通信用户的站间迁移。因此，相较于Case1中基站与用户的就近配对方案，Case2中基站与用户的平均通信距离增加，信号衰减加剧，在通信用户QoS需求相同的前提下，基站总功率升高。

4.4　通信用户QoS灵敏性分析

4.4.1　用户QoS需求对基站响应功率容量的影响

图4为典型时刻（23:00时刻），馈线3内全体基站实际响应功率与理论最大响应功率随用户QoS需求的柱状图。设置通信用户QoS需求基准值由100 Mbit/s以10 Mbit/s的速率递增至150 Mbit/s，共设置6组基准值对比分析，分别为：100、110、120、130、140、150、160 Mbit/s。

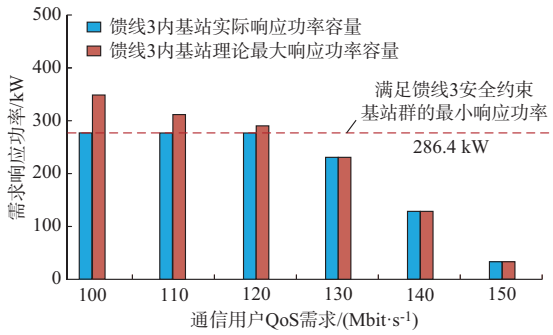

图4　馈线3基站需求响应功率容量变化柱状图
Fig. 4　Bar chart of demand response power capacity change of feeder 3 base station

前3组对比结果表明，随着用户QoS需求的递增，馈线3内基站群理论最大响应功率递减，实际响应功率不变；而当第4组通信用户QoS超过120 Mbit/s后，基站群理论最大响应功率与实际响应功率持平。这是由于基站额定发射功率的限制，基站群存在功率响应容量上限，伴随用户QoS需求的增加，在保障用户QoS不受损的前提下，基站可响应容量占比减小。由于前3组对比中基站可响应容量充足，可令馈线3内的峰值负荷削减至临界负载率以下，综合考虑基站激励成本后，基站群的实际响应功率均为刚好满足$N-1$约束的临界容量；而后3组对比中，由于用户的QoS需求较高，基站群可响应容量已无法满足馈线3的削峰需求，此时，不论配电网如何提高基站激励系数均无法使得馈线3满足$N-1$安全约束，并且此时基站群的可响应功率容量全部参与响应，即实际响应功率等于理论最大响应功率。

4.4.2　用户QoS需求对各类运行成本的影响

图5为全调度时段内，不同用户QoS需求基准值下的DNO基站激励成本与MNO净运行成本变化曲线。随着用户QoS需求的递增，MNO净运行成本随QoS需求递增单调增加，且斜率逐渐变大，DNO基站激励成本呈先递增后递减形态。

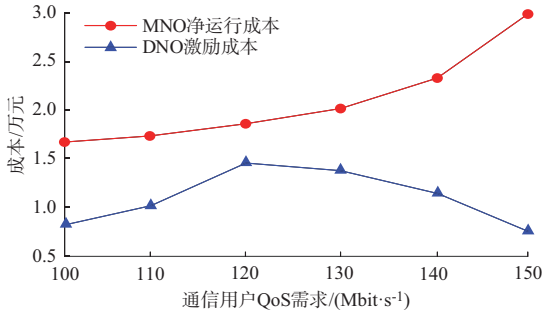

图5　DNO与MNO成本变化曲线
Fig. 5　Cost changing curves of DNO and MNO

首先，分析DNO基站激励成本的变化特征。前3组对比中的基站可响应功率容量充足，在相同的信号传递路径下，随着用户QoS需求递增，基站需上调发射功率以满足用户更快速的流量传输需求。发射功率升高后使得站间的信号干扰加剧，用于抵御信号干扰的功率成本势必提升。因此，在基站实际响应功率容量相同的前提下，DNO要支付更高的激励成本以引导基站参与需求响应。后3组对比中，由于基站可响应功率容量不足，伴随用户QoS需求递增，实际响应功率逐渐降低，故基站激励成本呈递减形态。

MNO基站净运行成本的变化受基站功耗成本与电网补贴收益共同影响。虽然前3组对比中基站的激励成本随QoS增加而增加，但由于基站用于

满足用户基本QoS需求的功耗成本上升更加明显，故对应的MNO净运行成本依然递增，并且在后3组对比中，伴随基站补贴收益的逐渐降低，MNO净运行成本上升斜率逐渐变大。

4.5　基于可行域迭代的算法有效性分析

双层互动模型采用基于ESGA的DNO内嵌MNO的求解方式实现求解，其中，上层DNO模型采用ESGA求解，下层MNO模型采用基于可行域迭代的算法求解。因此，下层MNO模型的求解精度与求解效率成为限制双层互动模型精确快速求解的关键因素，下层MNO模型求解算法的收敛性数学证明如附录I所示。附录J图J1为采用该算法求解下层模型时，MNO需求响应收益变化曲线。由图J1可知，在第9次迭代之前，MNO的需求响应收益不断调整，9次迭代后，MNO需求响应收益稳定收敛在6 575.14元，算法运行结束。

在上述数学证明与仿真实验验证算法可获得MNO模型精确唯一解的基础上，为验证该算法求解的快速性，采用粒子群算法求解MNO模型作为对照实验，对比两种算法对MNO模型的求解时间。粒子群算法的突出优点是原理简单、收敛速度快且需要调节的参数少，故该算法常被用来求解非线性等复杂优化问题[29]。设置两种算法在相同求解环境下运行，具体的运行结果如表2所示。

表2　两种算法运行效果对比
Table 2　Comparison of operation effects of two algorithms

算法	模型求解时长/s	优化得到的MNO净运行成本/元		
		1次结果	2次结果	3次结果
基于可行域迭代的算法	36.03	6 575.14	6 575.14	6 575.14
粒子群算法	120.36	7 545.64	7 894.51	7 231.46

分析表2数据可知，基于可行域迭代的算法的求解时长为36.03 s，粒子群算法的求解时长为120.36 s；同时，采用两种算法重复运行3次，基于可行域迭代的算法得到的MNO运行成本结果保持一致，均为6 575.14元，而粒子群算法运行结果并不一致。因此，相较于一般的智能寻优算法，本文提出的基于可行域迭代的算法对下层MNO通信优化模型具备更高的求解速率与更优的求解特性。

5　结语

本文提出了一种基于通信负载站间迁移的配电网与基站日前互动运行方法，通过算例分析得出如下结论：

1）MNO可通过控制基站发射功率的方式参与电网需求响应，且通过电网与基站的协同互动，不仅可以改善配电系统潮流分布，降低系统越限风险，而且可在保障通信用户QoS不受损害的前提下降低基站运行成本，实现了配电网与基站的互利共赢。

2）基站参与电网需求响应后，区域内基站与通信用户的信号传递距离增加，即在相同的用户QoS需求下，基站的总功耗升高。实验结果表明，在互动运行场景中，随着通信用户QoS需求的逐渐递增，系统内可响应的基站功率容量单调递减、MNO基站净运行成本单调递增、DNO基站激励成本先递增后递减。

3）基于可行域迭代的算法可有效求解下层MNO基站调度模型。实验结果表明，相较于一般的智能寻优算法，该算法具备更高的求解效率与更优的求解特性。

未来，在目前研究内容的基础上，可进一步考虑通信负荷的不确定性以及新能源接入对于基站与电网互动的影响。

附录见本刊网络版（http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx），扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

[1] 雍培，张宁，慈松，等.5G通信基站参与需求响应：关键技术与前景展望[J].中国电机工程学报，2021，41(16)：5540-5552.
YONG Pei, ZHANG Ning, CI Song, et al. 5G communication base stations participating in demand response: key technologies and prospects[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5540-5552.

[2] 王毅，陈启鑫，张宁，等.5G通信与泛在电力物联网的融合：应用分析与研究展望[J].电网技术，2019，43(5)：1575-1585.
WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric Internet of Things: application analysis and research prospects[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585.

[3] 麻秀范，刘子豪，王颖，等.考虑通信负载迁移及储能动态备电的5G基站光伏消纳能力研究[J].电工技术学报，2023，38(21)：5832-5845.
MA Xiufan, LIU Zihao, WANG Ying, et al. Research on photovoltaic absorption capacity of 5G base station considering communication load migration and energy storage dynamic backup[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21): 5832-5845.

[4] 郝伟韬，蔡国田，卢俊瞳，等.源网荷储互动减碳研究综述[J].广东电力，2023，36(11)：64-74.
HAO Weitao, CAI Guotian, LU Juntong, et al. Review of source-grid-load-storage interactive carbon reduction research[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(11): 64-74.

[5] 赵乐,许凌,张梦瑶,等.考虑非完美通信的高比例光伏配电网模糊电压控制策略[J].广东电力,2023,36(12):9-16.
ZHAO Le, XU Ling, ZHANG Mengyao, et al. Fuzzy voltage control strategy for high proportion photovoltaic distribution network considering non-perfect communication[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(12): 9-16.

[6] 张翔,廖海君,周振宇,等.含规模化5G基站租赁共享储能的配电网混合博弈优化调度[J].电测与仪表,2023,60(5):23-32.
ZHANG Xiang, LIAO Haijun, ZHOU Zhenyu, et al. Hybrid game optimal dispatching for distribution network with large-scale 5G base station leasing shared energy storage [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 23-32.

[7] 刘雨佳,樊艳芳.计及5G基站储能和技术节能措施的虚拟电厂调度优化策略[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(1):8-15.
LIU Yujia, FAN Yanfang. Optimal scheduling strategy for virtual power plant considering 5G base station technology, energy-storage, and energy-saving measures[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(1): 8-15.

[8] 林固静,高赐威,宋梦,等.含通信基站备用储能的虚拟电厂构建及调度方法[J].电力系统自动化,2022,46(18):99-107.
LIN Gujing, GAO Ciwei, SONG Meng, et al. Construction and dispatch method of virtual power plant with backup energy storage in communication base stations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 99-107.

[9] HAN J P, LIU N, HUANG Y J, et al. Collaborative optimization of distribution network and 5G mobile network with renewable energy sources in smart grid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 130: 107027.

[10] 李进鑫,张沛超,赵建立,等.基于负荷准线的5G基站虚拟电厂优化控制方法[J/OL].电网技术[2024-01-31].https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1492.
LI Jinxin, ZHANG Peichao, ZHAO Jianli, et al. Optimal control of 5G base station virtual power plant based on customer directrix load[J/OL]. Power System Technology[2024-01-31]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1492.

[11] GHAZZAI H, YAACOUB E, ALOUINI M S, et al. Optimized smart grid energy procurement for LTE networks using evolutionary algorithms [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(9): 4508-4519.

[12] POST B, BORST S, VAN DEN BERG H. A self-organizing base station sleeping and user association strategy for dense cellular networks [J]. Wireless Networks, 2021, 27 (1): 307-322.

[13] ZHAO S S. Energy efficient resource allocation method for 5G access network based on reinforcement learning algorithm [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023, 56: 103020.

[14] 周宸宇,冯成,王毅.基于移动用户接入控制的5G通信基站需求响应[J].中国电机工程学报,2021,41(16):5452-5462.
ZHOU Chenyu, FENG Cheng, WANG Yi. Demand response of 5G communication base stations based on admission control of mobile users[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5452-5462.

[15] 李昆,方家琨,艾小猛,等.考虑通信与配套设备协调优化的大规模5G宏基站网络能量管理模型[J].中国电机工程学报,2023,43(14):5391-5404.
LI Kun, FANG Jiakun, AI Xiaomeng, et al. Energy management model of large-scale 5G macro base station network considering the coordinated optimization of communication equipment and standard equipment [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5391-5404.

[16] 葛少云,蔡期塬,刘洪,等.考虑负荷特性互补及供电单元划分的中压配电网实用化自动布线[J].中国电机工程学报,2020,40(3):790-803.
GE Shaoyun, CAI Qiyuan, LIU Hong, et al. Practical automatic planning for MV distribution network considering complementation of load characteristic and power supply unit partitioning [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (3): 790-803.

[17] 高洪超,李楚一,王冠雄,等.聚合规模化5G基站的虚拟电厂动态构建与响应实证[J].电力系统自动化,2024,48(18):47-55.
GAO Hongchao, LI Chui, WANG Guanxiong, et al. Dynamic construction and response demonstration of virtual power plants with aggregated large-scale 5G base stations[J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(18):47-55.

[18] GALVAN-TEJADA G M, AGUILAR-TORRENTERA J. 5G connectivity for aerial scenarios: a new spatial and temporal perspective for wireless networks[C]// 2021 18th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), November 10-12, 2021, Mexico City, Mexico: 1-7.

[19] CAI S J, CHE Y L, DUAN L J, et al. Green 5G heterogeneous networks through dynamic small-cell operation [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(5): 1103-1115.

[20] LIU X Y, BIE Z H. Cooperative planning of distributed renewable energy assisted 5G base station with battery swapping system[J]. IEEE Access, 2021, 9: 119353-119366.

[21] LIU W J, CHEN S B, HOU Y H, et al. Optimal reserve management of electric vehicle aggregator: discrete bilevel optimization model and exact algorithm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4003-4015.

[22] 宋奎铮.基于代理商与区域分时电价的车网多时空互动方法[D].天津:天津大学,2021.
SONG Kuizheng. Multi-time-space interaction method of vehicle network based on time-of-use electricity price between agents and regions[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.

[23] XU J, ZHANG R. CoMP meets smart grid: a new communication and energy cooperation paradigm [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(6): 2476-2488.

[24] YONG P, ZHANG N, HOU Q C, et al. Evaluating the dispatchable capacity of base station backup batteries in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3966-3979.

[25] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.

[26] 韦良才.5G基站功耗的影响因素及应对策略[J].通信电源技术，2020，37(5)：214-215.
WEI Liangcai. Influence factors and countermeasures of 5G base station power consumption [J]. Communication Power Technology, 2020, 37(5): 214-215.
[27] CHE Y L, DUAN L J, ZHANG R. Dynamic base station operation in large-scale green cellular networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(12): 3127-3141.
[28] SHENG M, ZHAI D S, WANG X J, et al. Intelligent energy and traffic coordination for green cellular networks with hybrid energy supply [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 1631-1646.
[29] 李俊杰.计及用户差异化可靠性需求的配电网优化规划方法研究[D].北京：华北电力大学，2022.
LI Junjie. Research on optimal planning method of distribution network considering differentiated reliability requirements of users [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.

刘　洪(1979—)，男，博士，教授，主要研究方向：配电系统规划与运行等。E-mail：liuhong@tju.edu.cn

王志杰(1997—)，男，硕士研究生，主要研究方向：配电系统规划与运行。E-mail：2021234406@tju.edu.cn

徐正阳(1992—)，男，通信作者，博士，讲师，硕士生导师，主要研究方向：配电系统评估与规划运行。E-mail：xuzhengyang@tju.edu.cn

（编辑　冯慧敏）

Day-ahead Interactive Operation Method for Distribution Network and 5G Base Stations Based on Inter-station Migration of Communication Load

LIU Hong[1], *WANG Zhijie*[1], *XU Zhengyang*[1,2], *YANG Baijie*[1], *LI Junkai*[1], *ZHANG Shida*[1]

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education on Smart Power Grids (Tianjin University), Tianjin 300072, China;
2. Georgia Tech Shenzhen College, Tianjin University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Current research on 5G base stations as flexibility resources to participate in power grid interaction mostly focuses on the utilization of energy storage resources of 5G base stations, ignoring the regulatory potential of 5G base station communication load. Therefore, a day-ahead interactive operation method for distribution network operator (DNO) and mobile network operator (MNO) based on inter-station migration of communication load is proposed. Firstly, a DNO-MNO dual-layer interactive operation optimization model is constructed. In this model, DNO is an incentive strategy that comprehensively considers the system network loss cost and the incentive cost of the 5G base station, and takes the $N-1$ safe operation criterion of the system as a constraint and the lowest total system operating cost as an objective. MNO comprehensively considers the power consumption cost of the 5G base station and the grid demand response benefits, and develops the 5G base station power operation plan with the objective of the lowest net operating cost of the 5G base station. Secondly, to solve the problem that the lower-level MNO 5G base station scheduling model has non-convex and nonlinear constraints which are difficult to solve analytically, an algorithm based on feasible domain iteration is proposed to solve the model accurately. Thirdly, the algorithm of DNO-embedded MNO dual-layer interactive model based on the elitist selection genetic algorithm is proposed. Finally, a numerical case is given to verify the effectiveness and practicability of the proposed method.

This work is supported by the State Key Laboratory of Power System Operation and Control (No. SKLD23KM15) and Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province (No. 2022A1515110896).

Key words: distribution network; 5G base station; communication load; demand response; feasible region