

基于多目标双层优化和云边端协同的 配电网智能运维策略

汤未 陈宁 郭嘉琛 孙晓勇 王良毅

国网重庆市电力公司

摘要: 本文提出了一种基于多目标双层优化和云边端协同技术相结合的配电网智能化运维策略, 利用双层优化方法实现对配电网运维策略的优化, 并利用云边端协同技术实现智能化运维系统的实时数据采集和分析。该策略主要由两个层级构成, 在第一级中, 配电网执行其维护计划并将其结果报告给配电系统运营商。然后在第二级中, 配电系统运营商对整个配电网进行日前调度, 目标是 minimized 系统平均中断频率指数 (SAIFI)。两个层级中的规划均通过Epsilon-约束法以双目标问题来进行描述。最后进行了仿真实验验证, 结果表明该策略能够有效地提高配电网的运行效率和稳定性, 并且能够在多目标间取得平衡, 同时实现高效的云边端协同。

关键词: 多目标优化; 云边端协同; 配电网运维策略

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.08.077

引言

随着智慧城市的快速发展, 配电网作为城市电力供应系统的重要组成部分, 正承担着日益增长的电力需求^[1]。然而, 传统的配电网运维方法在面对复杂性、不确定性和多目标性等挑战时显得力有不逮。因此解决现有配电网运维方法存在的问题, 并提高配电网的运行效率和稳定性是一个研究的热点^[2,3]。

为了克服传统配电网运维方法的种种限制, 本文提出了一种基于多目标双层优化和云边端协同技术的智能化运维策略。该策略通过将优化问题划分为两个层级的方式, 实现了对配电网运维的全面优化。此外, 本文还引入了云边端协同技术, 以实现智能化运维系统的实时数据采集和分析^[4,5]。相比传统的单一目标优化方法和基于模型的方法, 所提出的策略能够同时考虑多个目标, 并且在复杂环境下具有更好的应对能力。

一、基于云平台的多目标双层优化模型建立

本文的研究对象是一个改进的69总线配电系统。该网络由四个配电网组成, 除了配电网外还有一部分属于配电系统运营商。每个配电网通过位于其服务区域内的分布式能源或从电网获取的能源提供其消费者所需的负载。此外, 在每个可再生能源附近会放置一个电能储存装置, 以减少功率输出的不确定性, 从而增强系统的灵活性。

(一) 第一层优化模型建立

在第一层优化问题中所建模的主要目标函数为式(1)的形式, 其约束形式见式(3)。从建立的数学模型可以看出在这层优化问题中考虑到了每个配电网的角度, 从而对问题进行求解, 最终将每个微网络的最优调度发送给电力系统运营商。

$$OF_1 = TC = \sum_{y=1}^Y \left[\frac{1}{(1+ir)^y} \left(\sum_{s=1}^S \rho_s \sum_{mg=1}^{MG} OC_{mg,s,y} + \sum_{(i,j) \in \Phi_{mg}^{\#}} C_{i,j,y}^{maintenance} \right) \right] \Delta t \quad (1)$$

$$OC_{mg,s,y} = \tau \sum_{g \in \Phi_{mg}^{\#}} \sum_{t=1}^T C_{g,t,s,y}^{gen} \Delta t + \tau \sum_{(i,j) \in \Phi_{mg}^{\#}} \sum_{t=1}^T \pi_{i,j,t,y}^e P_{i,j,t,y}^{line} \Delta t + \tau \sum_{e \in \Phi_{mg}^{\#}} \sum_{t=1}^T C_{e,t,s,y}^{EES} \Delta t \quad (2)$$

$$OF_2 = SAIFI_{t,y} = \sum_{s=1}^S \rho_s \sum_{mg=1}^{MG} \left(\frac{\sum_{i \in \Phi_{mg}^{\#}} NC_i CIF_{i,t,s,y}}{\sum_{i \in \Phi_{mg}^{\#}} NC_i} \right) \leq SAIFI_{it}^{max} \quad (3)$$

等式(1)包括每个配电网的总维护和运营成本的最小化, 此外还考虑了年贴现率。其中 ir 和 Y 分别是利率和计划年份, ρ_s 和 τ 分别是每种情况的概率和每年的天数。

配电网的运营成本可以通过等式(2)计算。其中 $C_{g,t,s,y}^{gen}$ 是燃气轮机的运行成本, $P_{i,j,t,s}^{line}$ 和 $\pi_{i,j,t,y}^e$ 分别是每个配电网所消耗的电量及其价格, $C_{e,t,s,y}^{EES}$ 是电能储存系统的运行成本, $C_{i,j,t,s,y}^{maintenance}$ 是配电网维护成本。

等式(3)将最小化系统平均中断频率指数的目标条件进行松弛处理, 以不等式形式对系统平均中断频率指数进行约束, 让其保证足够小即可。SAIFI是用户将经历的平均中断次数, NC_i 和 $CIF_{i,t,s,y}$ 分别是每个节点的客户数量及其中断频率, $SAIFI_{it}^{max}$ 是系统平均中断频率指数所允许的最大速率。

(二) 第二层优化模型建立

在第二层优化问题中, 从电力系统运营商的角度对问题进行考虑, 最大限度地减少配电网调度信息传输的时间偏差, 并最大限度地降低SAIFI。在该层优化问题中, 通过Epsilon约束方法将问题建模为两目标优化问题, 方程(4)和(5)分别是主要目标函数和运行约束。对主要目标函数进行建模, 以最大限度地减少配电网发送信息的时间的偏差惩罚。

$$OF_1 = PC = \sum_{y=1}^Y \sum_{s=1}^S \rho_s \left(\sum_{mg=1}^{MG} \left(\sum_{(i,j) \in \phi_{mg}^e} \sum_{t=1}^T \tau^p \left| \hat{P}_{i,j,t,s,y}^{line} - P_{i,j,t,s,y}^{line} \right| \right) \right) \quad (4)$$

$$OF_2 = SAIFI_{t,y} = \sum_{s=1}^S \rho_s \left(\frac{\sum_{i \in \phi_{bo}}^I NC_i CIF_{i,t,s,y}}{\sum_{i \in \phi_{bo}}^I NC_i} \right) \quad (5)$$

其中 $\left| \hat{P}_{i,j,t,s,y}^{line} - P_{i,j,t,s,y}^{line} \right|$ 是配电网的计划调度方案与实际调度方案之间的差异, τ^p 是对不负荷配电网调度计划的惩罚项。第二个目标函数是最小化整个网络中的 SAIFI。

二、配电馈线配置优化模型

式(6)至式(16)详细给出了配电网运维过程中配电馈线重新配置各个变量所需要满足的约束条件。

在式(6)和(7)中分别给出了配电网中每个节点的有功和无功功率平衡约束, 这些约束条件规定每个节点产生的功率和输入的总和必须等于该节点消耗的功率和输出之和。

$$P_{t,s,y}^{sub} \Big|_{i=1} = \sum_{g \in \phi_i^g} P_{g,t,s,y}^{Gen} + \sum_{w \in \phi_i^w} P_{w,t,s,y}^{Wind} + \sum_{pv \in \phi_i^{pv}} P_{pv,t,s,y}^{PV} \quad (6)$$

$$= \sum_{j(j \neq i)}^J P_{i,j,t,s,y}^{line} + P_{i,t,s}^{demand} (1+q)^{y-1} + P_{i,t,s,y}^{DR+} - P_{i,t,s,y}^{DR-}$$

$$Q_{t,s,t}^{sub} \Big|_{i=1} + \sum_{g \in \phi_i^g} Q_{g,t,s,y}^{Gen} = \sum_{j(j \neq i)}^J Q_{i,j,t,s,y}^{line} + Q_{i,t,s}^{demand} (1+q)^{y-1} \quad (7)$$

在式(8)和(9)中分别计算了配电网中输电线路的电纳和电导, 这两项变量分别为关于输电线路电阻和电抗的函数。

$$B_{i,i}^{line} = \frac{x_{i,j}}{r_{i,j}^2 + x_{i,j}^2} \quad (8)$$

$$G_{i,i}^{line} = \frac{r_{i,j}}{r_{i,j}^2 + x_{i,j}^2} \quad (9)$$

每条输电线路中的有功、无功功率和视在功率分别通过式(10)、(11)和(12)计算。

$$P_{i,j,t,s,y}^{line} = G_{i,j}^{line} (V_{i,t,s,y}^{bus} - V_{j,t,s,y}^{bus}) + B_{i,j}^{line} (\theta_{i,t,s,y}^{bus} - \theta_{j,t,s,y}^{bus}) + \frac{P_{i,j,t,s,y}^{loss}}{2} \quad (10)$$

$$Q_{i,j,t,s,y}^{line} = B_{i,j}^{line} (V_{i,t,s,y}^{bus} - V_{j,t,s,y}^{bus}) + G_{i,j}^{line} (\theta_{i,t,s,y}^{bus} - \theta_{j,t,s,y}^{bus}) \quad (11)$$

$$S_{i,j,t,s,y}^{line} = P_{i,j,t,s,y}^{line} + j Q_{i,j,t,s,y}^{line} \quad (12)$$

约束(13)限制了每条输电线路中的视在功率。

$$-S_{i,j}^{max} - M(1 - y_{i,j,t,y}) \leq S_{i,j,t,s,y}^{line} \leq S_{i,j}^{max} + M(1 - y_{i,j,t,y}) \quad (13)$$

约束条件(14)和(15)分别限制了每个节点处的电压幅度及其功率角度。

$$V_i^{min} \leq V_{i,t,s,y} \leq V_i^{max} \quad (14)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_{i,t,s,y} \leq \theta_i^{max} \quad (15)$$

每条输电线路的损耗量可以通过式(16)计算, 其是有功和无功功率流以及线路阻抗的函数。

$$P_{i,j,t,s,y}^{loss} = r_{i,j} \left[(P_{i,j,t,s,y}^{line})^2 + (Q_{i,j,t,s,y}^{line})^2 \right] \quad (16)$$

三、仿真实验

本文所提出的配电网智能运维策略, 首先会将输入数据上传到云端平台。在处理数据时, 本文所提出的模型中考虑了可再生能源的负载和输出功率的不确定性。仿真实验场景中配电网功率和负载的生成和减少分别通过概率分布函数和Sceneder工具完成。对输入数据进行处理之后求解双层优化模型。第一层优化问题中, 配电网进行规划并向电力系统运营商传输结果。在第二层优化问题中, 电力系统运营商根据配电网给出的结果进行网络调度优化, 来实现运行维护操作。在实现双层优化后, 电力系统运营商通过配电馈线重新配置来调整运行策略, 从而实现配电网的智能运维操作, 这将显著提高配电网系统的灵活性。

表1给出五种仿真模拟实验情形, 其不同情形下分别考虑的不同方法与措施。根据该表可以看出, 对于配电馈线重新配置(DFR)、维护服务(MS)的实施、需求响应(DR)计划的实施以及电能储存系统的存在对规划结果的影响等分别在不同的情况下有着不同的考虑。本文中所提出的模型是用GAMS软件中的DICOPT求解器求解的。表2显示了仿真模拟实验所需的数据。表3中提供了关于DER容量和位置的信息。

表1 不同仿真情况下所考虑的因素

| 情况 | DFR | MS | DR | EES |
|----|-----|----|----|-----|
| 1 | × | × | × | × |
| 2 | × | √ | × | × |
| 3 | √ | √ | × | × |
| 4 | √ | √ | √ | × |
| 5 | √ | √ | √ | √ |

表2 仿真实验中的数据

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|-------------------------------------|--------|---------------------|------|
| Peak($\pi_{t,y}^e$) | 18C/kW | γ_{min}^{DR} | 0.01 |
| SOC _e ^{initial} | 55% | γ_{max}^{DR} | 0.13 |
| SOC _e ^{min} | 32% | q | 2.5% |
| SOC _e ^{max} | 91% | ir | 4% |
| $\eta_e^{ch} / \eta_e^{dch}$ | 96% | τ | 365 |

表 3 DER 容量和位置信息

| DER 编号 | 位置总线编号 | 功率 (kW) | 类型 |
|--------|--------|---------|-----|
| 1 | 1 | 5100 | 配电站 |
| 2 | 49 | 290 | 热能 |
| 3 | 16 | 210 | 热能 |
| 4 | 23 | 490 | 热能 |
| 5 | 56 | 195 | 热能 |
| 6 | 21 | 140 | 风能 |
| 7 | 10 | 140 | 风能 |
| 8 | 68 | 90 | 风能 |
| 9 | 32 | 90 | 风能 |
| 10 | 11 | 50 | 风能 |
| 11 | 9 | 90 | 光伏 |
| 12 | 31 | 40 | 光伏 |
| 13 | 68 | 40 | 光伏 |
| 14 | 22 | 90 | 光伏 |

图1中的(a)-(c)分别描绘了一整天中负荷、风力和太阳辐射度的情景，图2描述了当天所对应的每小时电价。

实验结果表明，在情况1下的操作成本是最高的，在这种情况下，对于维护服务、DFR、DR程序和EES系统均没有进行考虑。与第一年相比，第十年配电网的总运营成本增加了68.19%，这是由于年负荷增加了2%，且缺乏维护服务。

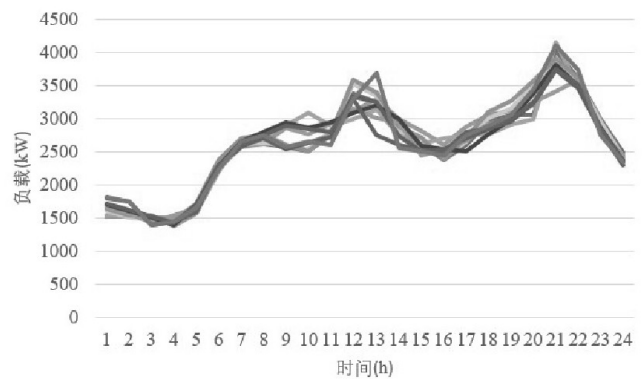
由于情况2下会在网络线路上执行预防性维护服务，配电网第一年的运营成本与情况1相似，但配电网第十年的总运营成本与情形1相比下降了约19%。因此，数值结果证实了预防性维护服务对长期降低运营成本的巨大影响。

在情况3下，配电系统能够更改网络拓扑。数值结果表明，尽管该情况下的维护成本增加了19.62%，但与情况2相比，第一年和第十年配电网的总运营成本分别下降了13.12%和12.67%。在这其中需要注意的是由于转换而产生的折旧会导致维护成本的增加。总体而言，与情况2相比总成本降低了12.73%。

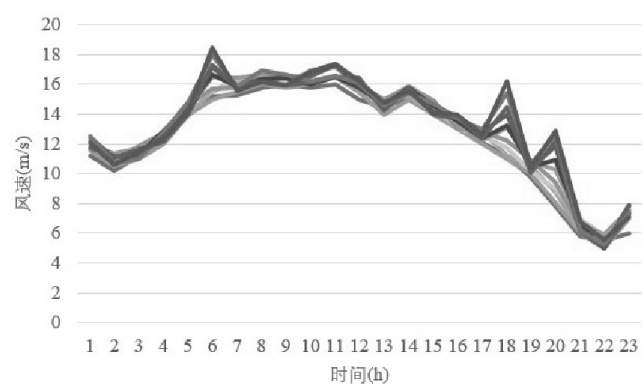
在情况4下配电网客户将能够基于价格来进行需求调节。实验结果表明，与情况3相比，需求响应计划第一年的总运营成本降低了16.41%，第十年下降了13.93%。

四、结论

本文针对智慧城市建设中配电网智能化运维的挑战，提出了一种基于多目标双层优化和云边端协同技术相结合的配电网智能化运维策略。通过对双层优化问题的分层处理和运用Epsilon-约束法进行多目标优化，本



(a) 负载



(b) 风速

文的策略能够在复杂性、不确定性和多目标性等方面取得平衡，并有效提高配电网的运行效率和稳定性。本文还引入了云边端协同技术，通过云端计算和边缘设备的数据采集与分析，实现了智能化运维系统对配电网状态和性能的实时监控和调整。这种云边端协同的方式不仅大幅提高了运维人员的响应速度和故障处理能力，还能够通过数据分析和预测为后续的优化决策提供支持。

参考文献

- [1] 周荣乐, 朱金凤. 智慧城市的智能配电网整体解决方案[J]. 电气时代, 2020(12): 26-28+36.
- [2] 余斌. 浅谈配电网运维管理及建设改造原则[J]. 中国高新技术企业, 2015(05): 49-50.
- [3] 刘璐华. 信息技术背景下提高配电网运维技术水平的方法[J]. 电子技术与软件工程, 2019(12): 253.
- [4] 朱翀霄, 郑伟, 宋鸿雁等. 配电网负荷均衡重构方法在配电网调度及运维检修中的应用[J]. 电气应用, 2018, 37(07): 18-21+49.
- [5] 吴英, 廖鹏毅, 黄迪洁. 含多个配电网的配电网特征分析与运维策略[J]. 分布式能源, 2018, 3(05): 34-39.

基金项目: 国网重庆市电力公司重点科技项目资助, 52200023000H, 基于云边端协同的配电网故障处置与主动运维关键技术研究及应用