

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.04.015

基于 ε -松弛的主动配电网有功-无功协调调度求解方法

邓振立¹, 张涛², 李荣³, 陈丽娟⁴

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052; 2. 国网江苏省电力有限公司淮安供电分公司, 江苏 淮安 223001; 3. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210019; 4. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:面对可控资源的调度特性差异与有功-无功的强耦合性,配电网在如何实现众多资源的协调运行及其模型高效求解方面面临诸多挑战。为解决上述问题,文中计及可调资源的多时段运行特性和无功调整能力,提出一种主动配电网有功-无功协调运行与高效求解方法。首先,利用二阶锥松弛与线性化建模技术,将模型转化为二阶锥规划问题。进而基于 ε -松弛,将二阶锥采用多面体进行松弛,将模型转换为 0-1 混合整数线性规划问题。最后,基于 IEEE 33 节点配电系统验证了该方法可以兼顾模型求解精度和求解效率,在实现风光充分消纳的基础上,达到节能降损、改善电压水平的目的。

关键词:主动配电网;有功-无功协调调度;二阶锥规划;线性化建模; ε -松弛

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)04-0104-08

0 引言

面对能源枯竭与环境污染等多重压力,发展可再生能源已成为各国在能源转型中的共同选择^[1-4]。与此同时,高比例分布式电源(distributed generation, DG)的接入给电力系统的安全运行与优化调度带来了新的挑战^[5-9],迫切需要寻求能更好解决过电压、弃风、弃光等难题的核心技术,主动配电网(active distribution network, ADN)应运而生。

ADN 的有功-无功优化调度本质上属于配电网有功-无功最优潮流(active reactive-optimal power flow, AR-OPF)范畴。其不仅要处理连续控制变量,还需处理离散控制变量,加之计及慢动作调控设备动作次数限制,其优化模型为一个具有强时空耦合的非凸非线性规划问题,难以求解^[10-11]。然而,在电力系统实际运行中需要在有限时间内提供合理的解决方案。因此,OPF 问题的非凸非线性与电力行业计算要求的快速准确性的矛盾是过去几十年推动最优潮流求解方法研究的主要动力^[11-13]。

为了满足实际运行的要求,电力工程界通常会选择牺牲求解精度来提高 AR-OPF 问题的计算性能,其挑战在于如何在尽可能少的牺牲求解精度的情况下,尽可能多的提高 AR-OPF 的求解效率。目前,针对此问题的求解方法主要包括启发式智能算法和数值优化法两大类。由于启发式算法存在无

法保证全局最优、求解速度较慢等缺点,寻求快速高效的数值分析法得到了国内外学者的广泛关注。文献[14-15]首次提出了基于二阶锥松弛(second-order cone relaxation, SOCR)技术的两步松弛法来求解 OPF,并证明了所提求解方法对于辐射式配电网的严格精确性。文献[16]通过 SOCR 技术将非凸潮流等式方程进行凸化松弛,并提出了一种可以协调连续和离散无功调整设备的两阶段优化求解方法。文献[17]基于 SOCR 技术,建立了以运行网损和改善电压水平为目标的配电网动态无功多目标二阶锥规划(second-order cone programming, SOCP)模型。文献[18]提出了一种基于支路潮流模型的凸包数学形式,提高了模型的求解性能,并研究了光伏(photovoltaic, PV)高比例接入下分布式储能的最优调度问题。

针对当前研究在众多可调资源有功-无功协调调度与优化模型高效求解两方面存在的问题,文中在现有研究基础上,计及可调资源的多时段运行特性和无功调整能力,提出一种 ADN 有功-无功协调运行与高效求解方法,从前瞻的视角统筹协调 ADN 中众多有功无功可调资源,以达到节能降损、改善电压水平的目的。

1 有功-无功协调优化数学模型

1.1 无功出力极限分析

在考虑配电网有功-无功强耦合特性的基础上,计及风电与光伏并网发电的无功调整能力,将更好地实现系统无功需求的就地补偿,降低系统的运行

收稿日期:2020-02-21;修回日期:2020-03-07

基金项目:国家电网有限公司科技项目“客户侧分布式储能柔性协调控制与联合运行关键技术研究”

网损,充分挖掘风电和光伏的潜在价值,并间接延缓传统无功补偿装置的投建与维护费用。

1.1.1 光伏无功出力极限分析

通过逆变器并网的光伏发电系统,利用合理的控制策略,并网逆变器可以在保证最大有功输出的同时,同步实现对电网的无功补偿,并网光伏逆变器可提供的最大无功功率为:

$$|Q_{PV}(t)|_{\max} = \sqrt{S_{PV,N}^2 - P_{PV}^2(t)} \quad (1)$$

式中: $P_{PV}(t)$, $Q_{PV}(t)$ 分别为并网光伏逆变器在时刻 t 的有功与无功出力; $S_{PV,N}$ 为光伏逆变器额定容量。

1.1.2 风机无功出力极限分析

目前,双馈异步风力发电机组(doubly fed induction generator, DFIG)已成为新建风电场的主流机型,利用对交直交变频器的控制调整实现功率的解耦控制,使之具备动态调节无功输出的能力。

DFIG 的无功出力极限可由定子和网侧变频器共同确定,其定子侧的无功输出极限^[19]可表示为:

$$Q_{s,\min} \leq Q_s \leq Q_{s,\max} \quad (2)$$

$$Q_{s,\min} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} - \sqrt{[3X_m U_s I_{r,\max} / (2X_s)]^2 - P_s^2} \quad (3)$$

$$Q_{s,\max} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} + \sqrt{[3X_m U_s I_{r,\max} / (2X_s)]^2 - P_s^2} \quad (4)$$

式中: P_s , Q_s 分别为 DFIG 定子侧的有功与无功输出; X_s , X_m 分别为 DFIG 的定子及定转子互感电抗; U_s 为 DFIG 的定子侧电压; $I_{r,\max}$ 为 DFIG 转子侧变频器的最大电流。

DFIG 网侧变频器的无功功率极限^[19]可表示为:

$$-\sqrt{S_{g,\max}^2 - P_g^2} \leq Q_g \leq \sqrt{S_{g,\max}^2 - P_g^2} \quad (5)$$

式中: P_g , Q_g 分别为 DFIG 网侧变频器的有功与无功输出; $S_{g,\max}$ 为 DFIG 网侧变频器的最大容量。

结合式(2)一式(5)可得,DFIG 能向系统输出的无功功率 Q_{wi} 上下限可表示为:

$$\begin{cases} Q_{wi,\min} = Q_{s,\min} - \sqrt{S_{g,\max}^2 - P_g^2} \\ Q_{wi,\max} = Q_{s,\max} + \sqrt{S_{g,\max}^2 - P_g^2} \end{cases} \quad (6)$$

1.2 ADN 的 Distflow 支路潮流形式及其凸化松弛

对于辐射式运行的 ADN,其经凸化松弛转化后的 Distflow 支路潮流^[20]形式如下,对于电网中节点 j ,有:

$$\begin{cases} \sum_{i \in u(j)} (P_{ij,t} - r_{ij} \tilde{I}_{ij,t}) = \sum_{k \in v(j)} P_{jk,t} + P_{j,t} \\ \sum_{i \in u(j)} (Q_{ij,t} - x_{ij} \tilde{I}_{ij,t}) = \sum_{k \in v(j)} Q_{jk,t} + Q_{j,t} \\ P_{j,t} = P_{j,t}^{\text{WT}} + P_{j,t}^{\text{PV}} + P_{j,t}^{\text{dis}} - P_{j,t}^{\text{ch}} - P_{j,t}^{\text{d}} \\ Q_{j,t} = Q_{j,t}^{\text{WT}} + Q_{j,t}^{\text{PV}} + Q_{j,t}^{\text{SVC}} + Q_{j,t}^{\text{CB}} + Q_{j,t}^{\text{dis}} - P_{j,t}^{\text{d}} \end{cases} \quad (7)$$

对于电网中支路 ij ,有:

$$\tilde{U}_{j,t} = \tilde{U}_{i,t} - 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \tilde{I}_{ij,t} \quad (8)$$

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ \tilde{I}_{ij,t} - \tilde{U}_{j,t} \end{array} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij,t} + \tilde{U}_{j,t} \quad (9)$$

式中: $u(j)$ 为配电网中以 j 为末端节点的支路首端节点集合; $v(j)$ 为配电网中以 j 为首端节点的支路末端节点集合; r_{ij} , x_{ij} 分别为支路 ij 的电阻和电抗; $U_{j,t}$ 为节点 j 时段 t 的电压幅值; $P_{ij,t}$, $Q_{ij,t}$ 分别为支路 ij 时段 t 的有功、无功功率; $P_{jk,t}$, $Q_{jk,t}$ 分别为支路 jk 时段 t 的有功、无功功率; $P_{j,t}$, $Q_{j,t}$ 分别为节点 j 时段 t 的净注入有功、无功功率; $P_{j,t}^{\text{WT}}$, $P_{j,t}^{\text{PV}}$, $P_{j,t}^{\text{dis}}$, $P_{j,t}^{\text{ch}}$ 及 $P_{j,t}^{\text{d}}$ 分别为节点 j 时段 t 所连接的风电(wind turbine, WT)的有功功率、PV 的有功功率、储能系统(energy storage system, ESS)的放电功率、ESS 充电功率、负荷的需求功率; $Q_{j,t}^{\text{WT}}$, $Q_{j,t}^{\text{PV}}$, $Q_{j,t}^{\text{SVC}}$, $Q_{j,t}^{\text{CB}}$, $Q_{j,t}^{\text{d}}$ 分别为节点 j 时段 t 所连接的 WT 的无功输出、PV 的无功输出、静止无功补偿器(static var compensator, SVC)的无功补偿功率、电容器组(capacitor banks, CB)的补偿功率与负荷的无功需求功率; $\tilde{I}_{ij,t}$ 为时段 t 支路 ij 的支路电流的平方; $\tilde{U}_{j,t}$ 为时段 t 节点 j 的节点电压幅值的平方。

1.3 目标函数

对于多源协同的 ADN 有功-无功优化运行模型,文中选取调度周期内的系统运行网损最小为目标函数,即:

$$\min \sum_{t=0}^T P_{t,\text{loss}}(P_t^{\text{dis}}, P_t^{\text{ch}}, Q_t^{\text{WT}}, Q_t^{\text{PV}}, Q_t^{\text{SVC}}, Q_t^{\text{CB}}) \quad (10)$$

式中: T 为调度周期内的时间段数; $P_{t,\text{loss}}$ 为时段 t 配电网系统的运行网损。

1.4 运行约束

1.4.1 潮流等式约束

潮流等式约束为式(7)一式(9)。

1.4.2 系统运行安全约束

$$\begin{cases} U_{i,\min} \leq U_{i,t} \leq U_{i,\max} \\ I_{ij,t} \leq I_{ij,\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $I_{ij,t}$ 为支路 ij 时段 t 的电流幅值; $U_{i,\max}$, $U_{i,\min}$ 分别为节点 i 电压幅值上下限; $I_{ij,\max}$ 为支路 ij 的电流幅值上限。

1.4.3 配变关口的运行约束

为了抑制 ADN 的功率波动对上级电网造成的冲击,需要将其配变关口交换功率以及功率波动控

制在一定范围内,此处对其作如下限制:

$$\begin{cases} P_{g,\min} \leq P_{g,t} \leq P_{g,\max} \\ Q_{g,\min} \leq Q_{g,t} \leq Q_{g,\max} \\ |P_{g,t} - P_{g,t-1}| \leq bE_{DC} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{g,t}$ 为时段 t 从上级电网注入配电网的有功功率; $P_{g,\max}, P_{g,\min}$ 分别为其上下限,无功功率运行约束类似; b 为主网能够承受的最大功率变化率; E_{DC} 为系统中 WT 与 PV 的装机总容量。

1.4.4 分组投切电容器 CB 的运行约束

受到生产制造技术的限制,频繁动作会缩短分组投切电容器的使用寿命,则在一个调度周期内 CB 的操作次数需要严格限制,且作为离散无功调节设备其每次投切均为分组操作,对其约束用二进制变量 0-1 进行建模处理,其运行约束如下:

$$\begin{cases} Q_{i,t}^{CB} = Q_{i,\min}^{CB} + N_{i,t}^{CB} Q_{i,\text{step}}^{CB} \\ N_{i,t}^{CB} = 2^0 x_{i,0} + 2^1 x_{i,1} + \dots + 2^k x_{i,k_i} \quad x_{i,k_i} \in \{0,1\} \\ 0 \leq N_{i,t}^{CB} \leq N_{i,t,\max}^{CB} \\ \log_2(N_{i,\max}^{CB} + 1) - 1 \leq k_i \leq \log_2(N_{i,\max}^{CB} + 1) \\ \sum_{t=1}^{T-1} B_{i,t}^{CB} = B_{\text{lim}}^{CB} \quad B_{i,t}^{CB} \in \{0,1\} \\ B_{i,t}^{CB} Q_{i,\text{step}}^{CB} \leq |Q_{i,t+1}^{CB} - Q_{i,t}^{CB}| \leq B_{i,t}^{CB} N_{i,\max}^{CB} Q_{i,\text{step}}^{CB} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $Q_{i,\text{step}}^{CB}, Q_{i,t}^{CB}$ 分别为节点 i 所连接的 CB 的单组补偿功率和实际投运补偿功率; $N_{i,t}^{CB}, N_{i,\max}^{CB}$ 分别为节点 i 所连接的 CB 实际投运组数和最大补偿组数; $B_{i,t}^{CB}$ 为 0-1 状态转换变量; B_{lim}^{CB} 为 CB 在一个调度周期内的动作次数限制。

1.4.5 储能系统 ESS 的运行约束

文中设 ESS 的当前周期初始 $E_{i,1}$ 和下一调度周期的初始 $E_{i,T+1}$ 相等,以保证在新的调度周期中 ESS 具有相同的调节性能。ESS 具体的运行约束如下:

$$\begin{cases} E_{i,t} + P_{i,t}^{\text{ch}} \eta_i^{\text{ch}} \Delta t - \frac{P_{i,t}^{\text{dis}}}{\eta_i^{\text{dis}}} \Delta t = E_{i,t} \quad t = 1, 2, \dots, T-1 \\ E_{i,t} + P_{i,t}^{\text{ch}} \eta_i^{\text{ch}} \Delta t - \frac{P_{i,t}^{\text{dis}}}{\eta_i^{\text{dis}}} \Delta t = E_{i,1} \quad t = T \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{\text{ch}} \leq P_{i,\max}^{\text{ch}} B_{i,t}^{\text{ch}} \quad B_{i,t}^{\text{ch}} \in \{0,1\} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{dis}} \leq P_{i,\max}^{\text{dis}} B_{i,t}^{\text{dis}} \quad B_{i,t}^{\text{dis}} \in \{0,1\} \\ B_{i,t}^{\text{ch}} + B_{i,t}^{\text{dis}} \leq 1 \\ E_{i,\max} \times 20\% \leq E_{i,t} \leq E_{i,\max} \times 90\% \end{cases} \quad (15)$$

式中: $E_{i,t}$ 为时刻 t 节点 i 上所连接的 ESS 的电量; $P_{i,t}^{\text{ch}}, P_{i,t}^{\text{dis}}$ 分别为相应 ESS 的充、放电功率; $\eta_i^{\text{ch}}, \eta_i^{\text{dis}}$ 分别为相应 ESS 的充、放电效率; Δt 为调度时间间隔;

$P_{i,\max}^{\text{ch}}, P_{i,\max}^{\text{dis}}$ 分别为节点 i 上所连接的 ESS 的充、放电功率上限; $B_{i,t}^{\text{ch}}, B_{i,t}^{\text{dis}}$ 分别为 ESS 充、放电状态变量; $E_{i,\max}$ 为相应的 ESS 的电量限值,同时,考虑到 ESS 的使用寿命,将其实际运行范围设定为 20%~90%^[20]。

此外,考虑到频繁充放电对储能系统寿命的影响,文中增加储能的充放电状态转换约束,以限制储能在一个调度周期内总的充放电转换次数。

$$\begin{cases} Y_{i,t}^{\text{dis}} + Z_{i,t}^{\text{ch}} \leq 1 \\ \sum_{t=1}^T (Y_{i,t}^{\text{dis}} + Z_{i,t}^{\text{ch}}) \leq N \\ Y_{i,t}^{\text{dis}} - Z_{i,t}^{\text{ch}} = B_{i,t+1}^{\text{dis}} - B_{i,t}^{\text{dis}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $Y_{i,t}^{\text{dis}}, Z_{i,t}^{\text{ch}}$ 分别为储能 i 时段 t 的充、放电转换状态变量; N 为储能系统充放电转换次数限值。

1.4.6 有载调压变压器建模

作为离散无功调节设备,有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)的频繁动作会缩短其使用寿命,直接增加电网的投资成本,因此一个调度周期内其动作次数需严格限制,其运行约束如下:

$$\begin{cases} U_{i,\min}^2 \leq U_{i,t,h}^2 \leq U_{i,\max}^2 \\ k_{i,\min} \leq k_{i,t} \leq k_{i,\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $U_{i,t,h}$ 为配变高压侧电压值,为恒定值; $k_{i,\max}, k_{i,\min}$ 分别为 OLTC 可调变比上、下限的平方; $k_{i,t}$ 为 OLTC 变比的平方,并借助于 0-1 变量,对其进行建模处理如下:

$$k_{i,t} = k_{i,\min} + \sum_s k_{i,s} \gamma_{j,s,t}^{\text{OLTC}} \quad (18)$$

式中: $k_{i,s}$ 为 OLTC 档位 s 与档位 $s-1$ 变比平方的差值; $\gamma_{j,s,t}^{\text{OLTC}}$ 为 0-1 标识变量。

考虑 OLTC 在一个调度周期内的动作次数限制,进一步,利用 0-1 变量对其建模^[21]如下:

$$\begin{cases} \gamma_{i,N,t}^{\text{OLTC}} \leq \gamma_{i,2,t}^{\text{OLTC}} \leq \gamma_{i,1,t}^{\text{OLTC}} \\ \lambda_{i,t,\text{in}}^{\text{OLTC}} + \lambda_{i,t,\text{de}}^{\text{OLTC}} \leq 1 \\ \gamma_{i,t,\text{in}}^{\text{OLTC}} - \gamma_{i,t,\text{de}}^{\text{OLTC}} N_i \leq \sum_s \gamma_{i,s,t}^{\text{OLTC}} - \sum_s \gamma_{i,s,t-1}^{\text{OLTC}} \\ \sum_s \gamma_{i,s,t}^{\text{OLTC}} - \sum_s \gamma_{i,s,t-1}^{\text{OLTC}} \leq \gamma_{i,t,\text{in}}^{\text{OLTC}} N_i - \gamma_{i,t,\text{de}}^{\text{OLTC}} \\ \sum_{t \in T} (\lambda_{i,t,\text{in}}^{\text{OLTC}} + \lambda_{i,t,\text{de}}^{\text{OLTC}}) \leq N_{i,\text{lim}}^{\text{OLTC}} \\ \lambda_{i,t,\text{in}}^{\text{OLTC}}, \lambda_{i,t,\text{de}}^{\text{OLTC}} \in \{0,1\} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\lambda_{i,t,\text{in}}^{\text{OLTC}}$ 和 $\lambda_{i,t,\text{de}}^{\text{OLTC}}$ 为 OLTC 档位调节变化标识; N_i 为其档位最大变化范围; $N_{i,\text{lim}}^{\text{OLTC}}$ 为调度周期内 OLTC 的档位最大允许动作次数。

1.4.7 DG 运行约束

WT、PV 等可再生清洁能源发电的高效利用是发展 ADN 的核心价值之一。文中在保证 WT 和 PV

全额并网消纳的前提下,制定 ADN 多源协同优化运行的调度策略,因此,WT 与 PV 的运行约束可表示为:

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{PV}} = P_{i,t,\text{pre}}^{\text{PV}} \\ P_{i,t}^{\text{WT}} = P_{i,t,\text{pre}}^{\text{WT}} \end{cases} \quad (20)$$

式(1)~式(6)

式中: $P_{i,t,\text{pre}}^{\text{PV}}$, $P_{i,t,\text{pre}}^{\text{WT}}$ 分别为时段 t 节点 i 上所连接的 PV 和 WT 的预测功率; $P_{i,t}^{\text{PV}}$, $P_{i,t}^{\text{WT}}$ 分别为时段 t 节点 i 上所连接的 PV 和 WT 的实际功率。下文仿真算例中将直接给出 PV 和 WT 的预测功率。

1.4.8 SVC 运行约束

由于 DG 的大规模并网,在负荷低谷时段可引起逆向潮流,从而导致过电压问题,则传统的纯容性补偿方式应当适当调整。考虑到 SVC 的发展前景,文中将 SVC 作为可调资源,其运行约束如下:

$$Q_{i,\text{min}}^{\text{SVC}} \leq Q_{i,t}^{\text{SVC}} \leq Q_{i,\text{max}}^{\text{SVC}} \quad (21)$$

式中: $Q_{i,\text{max}}^{\text{SVC}}$, $Q_{i,\text{min}}^{\text{SVC}}$ 分别为 SVC 的可调功率的上、下限; $Q_{i,t}^{\text{SVC}}$ 为时段 t 节点 i 上所连接的 SVC 的无功补偿功率。

2 ε -松弛转换

经过凸化松弛后,具有强时空耦合的非凸非线性动态规划已经转化为一个 0-1 混合整数二阶锥规划 (mixed integer second-order cone programming, MISOCP) 问题,但转换后的模型仍是一个强时空耦合的优化问题,文中在保证尽可能少的牺牲求解精度的情况下,基于 ε -松弛,将二阶锥进一步松弛为多面体,使得模型转化为可高效求解的 0-1 混合整数线性规划 (mixed integer linear programming, MILP)。

首先,将式(9)表示的二阶锥约束利用 2 个三维二阶锥联合表示为:

$$\begin{cases} \left\| \begin{matrix} P_{ij,t} \\ Q_{ij,t} \end{matrix} \right\|_2 \leq Z_{ij,t} \\ \left\| \begin{matrix} 2Z_{ij,t} \\ \tilde{I}_{ij,t} - \tilde{U}_{j,t} \end{matrix} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij,t} + \tilde{U}_{j,t} \end{cases} \quad (22)$$

式(22)的一般形式可表述如下:

$$\left\| \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \end{matrix} \right\|_2 \leq x_3 \quad (23)$$

即为:

$$\sqrt{x_1^2 + x_2^2} \leq x_3 \quad (24)$$

式中: $Z_{ij,t}$ 为过程中间辅助变量。

然后,基于 Ben-Tal and Nemirovski 提出的“ ε -松

弛”法,利用多面体对二阶锥进行近似描述^[22],从而将 MISOCP 问题转换成 MILP 问题进行求解。最后,转化后的二阶锥的多面体近似表述为:

$$\begin{cases} \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \leq (1 + \varepsilon)x_3 & \varepsilon = \left(\cos^2 \frac{\pi}{2^{k+1}} \right)^{-1} - 1 \\ a_k = a_{k-1} \cos \frac{\pi}{2^{k+1}} + b_{k-1} \sin \frac{\pi}{2^{k+1}} & a_0 \geq |x_1| \\ b_k \geq \left| -a_{k-1} \sin \frac{\pi}{2^{k+1}} + b_{k-1} \cos \frac{\pi}{2^{k+1}} \right| & b_0 \geq |x_2| \\ a_K \leq x_3 & b_K \leq a_K \tan \frac{\pi}{2^{k+1}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $k = 1, 2, \dots, K$ 。利用式(25)中的等式对其余各式进行简化,以消除 K 个等式约束和 K 个变量 a_k 。

二阶锥的多面体近似描述的本质是对于任意给定的足够小的松弛变量 ε ,将优化问题中关于变量 (x_1, x_2, x_3) 的三维二阶锥约束近似等价于一组关于变量 (x_1, x_2, x_3, a_0) 和 $K+1$ 个变量 $(b_k, k=0, 1, \dots, K)$ 的线性不等式约束,如图 1 所示。基于此,二阶锥规划模型即可通过 ε -松弛转换为线性规划问题进行求解。 ε 越小,二阶锥的多面体近似描述精度越高。

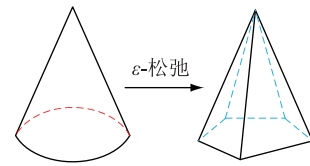


图 1 ε -松弛示意

Fig.1 Schematic of ε -relaxed

松弛变量 ε 可表示为:

$$\varepsilon = \frac{1}{\cos^2(\pi/2^{K+1})} - 1 \quad (26)$$

若取 $K=11$,可求得 $\varepsilon \approx 6 \times 10^{-7}$ ^[23]。此时,0-1 MISOCP 问题可以近似等价于可高效求解的 0-1 MILP 问题。

3 仿真分析

3.1 开发环境

在 Matlab 开发环境下,基于 Yalmip 建模平台,开发相应的调度程序,并调用数学规划优化器 Gurobi 进行求解。其中,测试系统的硬件环境为 Intel (R) Core (TM) i5-6200U 2.30 GHz,操作系统为 Win7 64bit,开发环境为 Matlab R2014a, Yalmip 版本为 20171121, Gurobi 版本为 6.0.5。

3.2 算例概述

基于 IEEE 33 节点配电算例,将 WT、PV、ESS、OLTC、CB、SVC 接入配电系统来验证所提方法,配电系统模型参数详见文献[24]。其中,OLTC 接入根节点 1,调节范围 $[0.95, 1.05]$ p.u.,共分为 5 个档位,每个调度周期内允许动作次数为 5;CB 接入节点 3 和 9 (CB3, CB9),其额定容量为 $0.2 \text{ MV}\cdot\text{A}$,均分为 10 组,每个调度周期内允许动作次数为 5;WT 接入节点 20 和 25 (WT20, WT25),额定容量为 $0.3 \text{ MV}\cdot\text{A}$;PV 接入节点 14 和 28 (PV14, PV28),额定容量为 $0.2 \text{ MV}\cdot\text{A}$;ESS 接入节点 18 和 33 (ESS18, ESS33),额定容量为 $1\ 200 \text{ kW}\cdot\text{h}$,充放电功率上限为 300 kW ,充放电效率为 93.81% ;SVC 接入节点 22 与 31 (SVC22, SVC31),无功调节范围为 $-100\sim 200 \text{ kvar}$ 。其中,配电算例中可调资源接入类型与位置如图 2 所示。

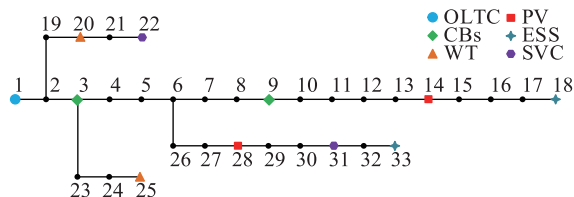


图 2 IEEE 33 节点配电网络

Fig.2 Modified IEEE 33-bus distribution network

3.3 结果分析

基于典型负荷需求、WT 与 PV 有功出力预测曲线,以各自的预测峰值为基准,将各个时段的预测值折算成对应比例,得到日前各时段的负荷需求、WT 及 PV 的有功出力比例系数。同时,考虑到配电系统涵盖的区域面积不大,文中所有的 WT、PV 均采用相同的风速和光照曲线,如图 3 所示。

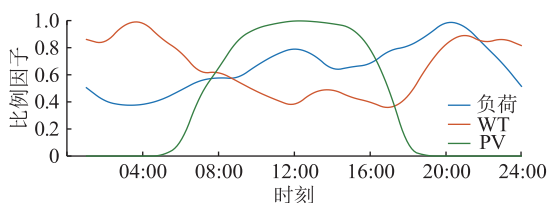


图 3 负荷需求和风电及光伏有功出力预测系数

Fig.3 Forecast of load, WT and PV for next day

基于图 3 所示的风光荷的信息,对 ADN 有功-无功协调运行与高效求解方法进行仿真。图 4 为优化调度前后各时段的运行网损;图 5 为优化调度后各时段的节点电压;图 6 为 OLTC 的调度计划;图 7 为 ADN 中 WT、PV、CB 以及 SVC 的调度计划;图 8 为 ESS 的充放电策略。

由图 4 可知,在对 ADN 中的可控资源进行优化

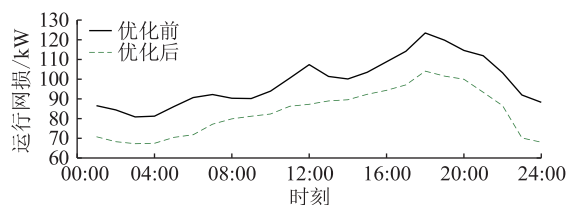


图 4 优化调度前后配电系统的网损对比

Fig.4 Comparison of network loss before and after optimization dispatch

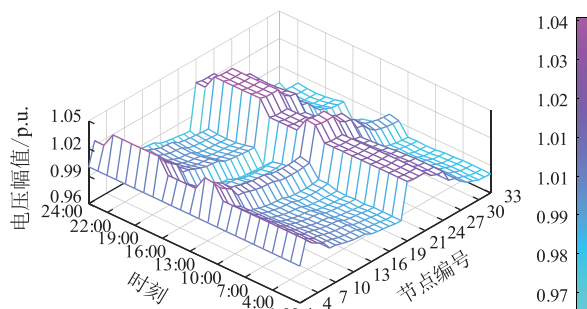


图 5 优化调度后各时段的节点电压

Fig.5 The node voltage of each period after optimization dispatch

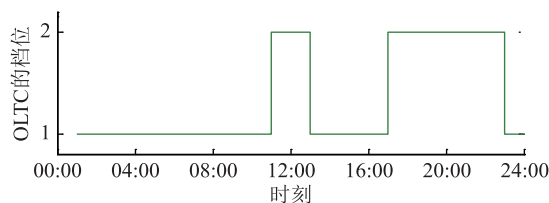


图 6 OLTC 各时段的投切档位

Fig.6 Switching gear of OLTC in each period

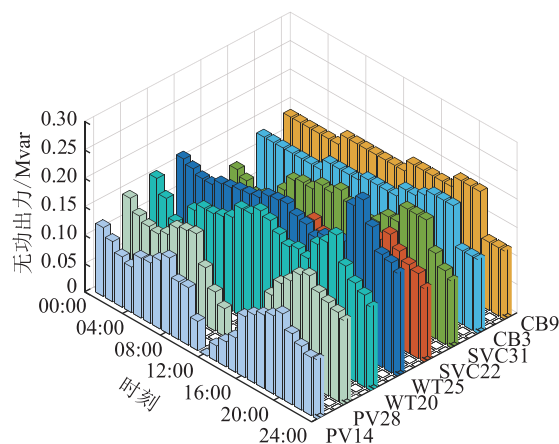


图 7 可调资源的协调调度计划

Fig.7 Coordinated dispatch plans of adjustable resource

调度后,系统各时段的运行网损得到了大幅度的改善。由图 5 可知,在优化调度后,配电系统的各时段的节点电压均在 $[0.95, 1.05]$ p.u.内,满足配电网对电压水平的要求。结合图 4 和图 5 可知,文中调度

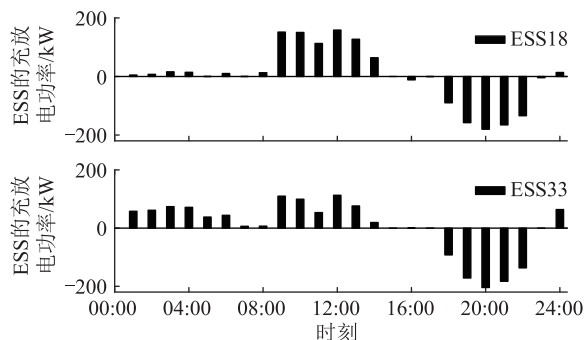


图8 ESS的各时段的充放电功率
Fig.8 Charge and discharge plan for each period of ESS

策略在实现 DG 充分消纳的情况下,达到节能降损、改善电压水平的目的。

由图 6 可知,OLTC 投切策略满足动作次数与调节范围约束,其投切档位整体与系统的负荷需求相吻合。此外,在调度周期内,OLTC 均为正向调节,这是因为原始的 IEEE 33 配电系统馈线末端节点电压过低,远没有达到合格水平^[25]。

对于 WT 和 PV 的优化调度策略,由图 7 可知,整体来看,WT 和 PV 均是在其有功出力较大的时段,对应的无功出力较小,这是与 WT 与 PV 的无功出力受各自的并网逆变器视在功率限制相吻合的。同时,在 PV 无功出力能力较小的 10:00—14:00 时段,WT 输出更多的无功出力来满足系统的无功需求;在夜间风电无功出力能力较小的时段,PV 逆变器输出了更多的无功来满足系统的需求,WT 与 PV 在有功和无功 2 个层面都实现了协调互济。对于可连续快速调节的 SVC,其均为容性补偿,并且较好地跟踪了负荷波动。对于 CB,接入节点 3 和节点 9 的 CB 均满足其动作次数与无功出力范围约束,并且其操作多出现在系统净负荷波动较大的时刻。由图 8 可知,在整体上,ESS 呈现出在净负荷低谷的时段进行充电,在净负荷高峰时段进行放电的趋势,较好的达到了降低系统运行网损和消纳风电和光伏的目的。

3.4 求解效率与松弛精确性

在传统的辐射状配电系统中,SOCP 准确性在文献[14—15]中已得到验证,则文中以基于 SOCP 技术转化得到的 MISOCP 模型为基准,通过 IEEE 33 和 PG&E 69 节点配电系统,对基于 ε -松弛与线性化建模技术转换后 0-1MILP 模型的求解准确性和求解效率进行验证。

其中,测试算例 PG&E 69 节点配电网包括 69 个节点和 73 条支路。OLTC 接入根节点 1,可调范围为[0.95, 1.05] p.u.,共有 11 个档位;电容器组接

入节点 21 和 61,每组的额定容量均为 0.4 MV·A,共 20 组;WT 接入 16、28、51 和 66 节点,其额定容量均为 0.5 MV·A;PV 接入 41、54、56 和 58 节点,其额定容量均为 0.5 MV·A。其拓扑结构与模型参数详见文献[24]。

表 1 为不同方法求解性能比较,由表 1 可知,对于 IEEE 33 与 PG&E 69 节点算例,相比于 MISOCP 模型,在将优化目标的相对误差控制在 10^{-3} 数量级条件下,MILP 模型在求解速度上分别提高了 55.08%和 49.61%,由此可知,基于 ε -松弛与线性化建模技术转化后的 MILP 模型在保证求解精确度的条件下,在较大程度上提高了求解效率,验证了文中求解方法的有效性。

表 1 不同方法求解性能比较
Table 1 Performance comparison between different solutions

测试算例	性能指标	方法	
		MISOCP	MILP
IEEE 33	优化目标/MW	1.769 2	1.778 1
	求解时间/s	1.921 0	0.863 0
PG&E 69	优化目标/MW	1.962 6	1.955 1
	求解时间/s	4.219 0	2.126 0

4 结语

针对配电网优化运行中的现存问题,文中计及日前数据和可调资源的多时段运行特性,提出一种 ADN 有功-无功协调运行与高效求解方法,从前瞻的视角统筹协调众多有功无功可调资源。研究表明:提出的面向 DG 充分消纳与高效利用的 ADN 有功-无功协调调度策略,不仅提高了系统运行的经济性与安全性,而且可以间接降低无功设备的投资成本和运行维护费用;基于 ε -松弛与线性化建模技术,将二阶锥采用多面体进行松弛,将模型进一步转换成可高效求解的 0-1 混合整数线性规划问题,较好地兼顾了模型的求解精度和求解效率。

参考文献:

- [1] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):12-18.
FAN Mingtian,ZHANG Zuping,SU Aoxue,et al. Enabling technologies for active distribution systems [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(22):12-18.
- [2] 代贤忠,韩新阳,董益华,等. 能源互联网多源多层次协调优化方法研究[J]. 电力工程技术,2019,38(2):1-9.
DAI Xianzhong,HAN Xinyang,DONG Yihua,et al. Multi-source and multi-level coordination optimization method of energy internet [J]. Electric Power Engineering Technology,2019,38(2):1-9.

- [3] 卢林煜,王鲁杨,柏扬,等. 面向能源互联网的固态变压器中双有源桥直流变换器研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(6):141-150.
LU Linyu, WANG Luyang, BAI Yang, et al. Research on dual-active-bridge DC-DC converter in solid state transformer for energy internet[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6):141-150.
- [4] 任德江,吴杰康,毛骁,等. 考虑风电消纳的综合能源系统源荷协调运行优化方法[J]. 智慧电力,2019,47(9):37-44.
REN Dejiang, WU Jiekang, MAO Xiao, et al. Optimal method for source-load coordinated operation of integrated energy system considering wind power absorption[J]. Smart Power, 2019, 47(9):37-44.
- [5] CHEN Lijuan, DENG Zhenli, XU Xiaohui. Two-stage dynamic reactive power dispatch strategy in distribution network considering the reactive power regulation of distributed generations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2):1021-1032.
- [6] 焦瑞浩,丁剑,任建文,等. 适应大规模清洁能源并网和传输的未来新型直流电网研究[J]. 智慧电力,2019,47(6):9-18.
JIAO Ruihao, DING Jian, REN Jianwen, et al. Future new DC power grids for large-scale clean energy integration and transmission[J]. Smart Power, 2019, 47(6):9-18.
- [7] 李婷,胥威汀,刘向龙,等. 含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(12):177-187.
LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12):177-187.
- [8] 符杨,廖建波,李振坤,等. 考虑越限风险的主动配电网日前优化调度及运行[J]. 中国电机工程学报,2017,37(21):6328-6338.
FU Yang, LIAO Jianbo, LI Zhenkun, et al. Day-ahead optimal scheduling and operating of active distribution network considering violation risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21):6328-6338.
- [9] 韩华春,窦晓波,李强,等. 基于 MPC 的主动配电网多级电压控制[J]. 电力工程技术,2019,38(3):41-49.
HAN Huachun, DOU Xiaobo, LI Qiang, et al. Multi-level voltage control in active distribution network based on model predictive control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(3):41-49.
- [10] MOLZAHN D K. Computing the feasible spaces of optimal power flow problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6):4752-4763.
- [11] COFFRIN C, HIJAZI H L, HENTENRYCK P V. The QC relaxation: a theoretical and computational study on optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 31(4):3008-3018.
- [12] 吴霜,季聪,孙国强,等. 含分布式储能的配电网多目标优化运行策略研究[J]. 电力工程技术,2018,37(2):20-26.
WU Shuang, JI Cong, SUN Guoqiang, et al. Multiple objection operation strategy optimization research of distribution network including distributed energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2):20-26.
- [13] 徐妍,邓振立,朱旭,等. 有源配电网多阶段动态无功高效求解策略[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(9):20-27.
XU Yan, DENG Zhenli, ZHU Xu, et al. Multi-stage dynamic reactive power efficient solving strategy for active distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(9):20-27.
- [14] FARVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification-part I[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2554-2564.
- [15] FARVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification-part II[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2565-2572.
- [16] DING T, LIU S, WU Z, et al. Sensitivity-based relaxation and decomposition method to dynamic reactive power optimization considering DGs in active distribution networks[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 11(1):37-48.
- [17] TIAN Z, WU W, ZHANG B, et al. Mixed-integer second-order cone programming model for VAR optimization and network reconfiguration in active distribution[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(8):1938-1946.
- [18] LI Q, VITTAL V. Convex hull of the quadratic branch AC power flow equations and its application in radial distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 33(1):839-850.
- [19] 郎永强,张学广,徐殿国,等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报,2007,27(9):77-82.
LANG Yongqiang, ZHANG Xueguang, XU Dianguo, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9):77-82.
- [20] 刘一兵,吴文传,张伯明,等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2575-2583.
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2575-2583.
- [21] 高红均,刘俊勇,沈晓东,等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. 中国电机工程学报,2017,37(6):1634-1644.
GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6):1634-1644.
- [22] BEN-TAL A, NEMIROVSKI A. On polyhedral approximations of the second-order cone[J]. Mathematics of Operations Re-

- search, 2001, 26(2): 193-205.
- [23] ZHAO J L, YU Y Y, LI P. Application of conic programming for optimal distributed generation allocation in distribution network [C]//Proceedings of 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Shenzhen, China, 2004: 504-507.
- [24] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析(第2版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
WANG Shouxiang, WANG Chengshan. Modern distribution system analysis(second edition) [M]. Beijing: Higher education press, 2014.
- [25] WANG C, XIANG L, DENG Z, et al. Reactive power optimization

dispatch strategy in distribution network with distributed generators[J]. The Journal of Engineering, 2017, 2017(13): 1418-1422.

作者简介:



邓振立

邓振立(1992),男,硕士,从事有源配电网的优化运行相关工作(E-mail: dengzhenli2016@163.com);

张涛(1975),男,学士,工程师,从事电动汽车充电设施建设运营工作;

李荣(1977),男,硕士,工程师,从事电动汽车充放电设施和运营服务工作。

Active-reactive coordination scheduling method for active distribution network based on ε -relaxation

DENG Zhenli¹, ZHANG Tao², LI Rong³, CHEN Lijuan⁴

(1. State Grid Henan Electric Power Company Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. State Grid Huaian Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Huaian 223001, China;

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

4. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Faced with the difference in dispatch characteristics of controllable resources and the strong coupling of active and reactive power, the distribution network is facing many challenges in how to realize the coordinated operation of many resources and the efficient solution of the model. To solve the above problems, an ADN active-reactive coordination operation and efficient solution method considering the multi-period operation characteristics and reactive power adjustment ability of adjustable resources are proposed. Firstly, based on the second-order cone relaxation and linearization modeling technology, the optimization model is transformed into MISOCP. Further, based on the " ε -relaxation" method, the second-order cone is relaxed by polyhedron, and the model is transformed into a 0-1 MILP that can be efficiently solved. Finally, based on the IEEE 33-node power distribution system, it is verified that the proposed method can balance the accuracy and efficiency of the model. Meanwhile, on the basis of realizing the full consumption of WT and PV, the purpose of saving energy and reducing voltage levels is achieved.

Keywords: active distribution network; active-reactive coordination dispatch; second-order cone relaxation; linear modeling; ε -relaxation

(编辑 方晶)