

考虑价格需求响应的主动配电网动态经济调度

张刘冬¹, 丁昊², 袁晓冬¹, 曾飞¹, 李强¹, 袁宇波¹

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211106)

摘要:随着分布式发电的渗透率提高,配电网会出现馈线过载、电压越限等问题,从而限制了分布式电源的接入。需求响应利用负荷侧可控资源参与主动配电网调度可以促进大规模分布式电源消纳。本文将价格型需求响应引入现有主动配电网的多时段优化运行调度模型,构建了三相主动配电网有功-无功协调动态经济调度模型,并提出了基于混合整数二阶锥规划的模型求解方法。该模型可通过需求响应负荷调节,并协调与分布式电源、储能装置、无功补偿装置的动态优化运行,达到节能降损、保证馈线负载、电压不越限的目的,实现主动配电网全局能量管理优化。对扩展的 IEEE 33 节点测试系统进行仿真分析,验证了所提出模型及算法的有效性和优越性。

关键词:主动配电网;分布式电源;价格需求响应;经济调度;混合整数二阶锥规划

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)04-0031-06

0 引言

随着配电网中分布式电源(distributed generation, DG)、储能系统(energy storage system, ESS)、无功补偿装置等设备的渗透率日益提高,传统配电网正在逐步向具有众多可调可控资源的主动配电网(active distribution networks, ADN)转变^[1,2]。大规模 DG 并网会引起电压波动甚至过电压越限,并导致馈线潮流双向流动及过载,严重限制了 ADN 对 DG 的消纳^[3]。从日前日内多时段优化运行的前瞻视角确定 ADN 各可调设备的运行操作策略,是解决该类问题的一种有效工具^[4-8]。

针对 ADN 多时段优化策略的制定,文献[5-7]通过调度 ADN 中的 ESS 和 DG 等可调资源,研究了 ADN 多时段优化问题。文献[8]建立了一个混合整数非凸非线性规划模型,将变压器的有载调压分接头和静止无功补偿器的优化调度考虑在内,并提出了一种离散变量连续化处理再规整的两阶段求解方法。另外,建立配电网优化调度的三相模型已逐渐成为研究的主流^[9-13],并且如何在三相有功无功耦合的模型基础上解决 ADN 的双向潮流、线路损耗、弃风(光)、过电压、馈线过载等问题是配电网运行管理中面临的挑战^[3]。

现有研究并未考虑将需求侧资源参与配电网互动,构建从日前、日内到实时的多时间尺度滚动协调的需求响应(demand response, DR)优化调度模式,以有效提升 DG 消纳水平,实现 ADN 全局能量

管理优化。针对该问题,本文将价格型需求响应引入现有三相 ADN 的多时段优化运行调度模型^[14],建立了考虑 DG、ESS、无功补偿装置以及需求响应负荷的连续、离散控制变量的三相 ADN 有功无功协调动态经济调度模型,以达到调节电压水平、提高能源资源利用率、节能降损的目的,保证配电网整体的安全高效运行。此外将该模型转化为混合整数二阶锥规划问题,并采用 CPLEX 优化软件对该问题进行求解,采用扩展的 IEEE 33 节点三相测试系统进行算例分析,验证了本文方法的有效性和优越性。

1 价格型需求响应模型

价格型 DR 是通过价格信号(如分时电价、实时电价)引导用户合理调节和改善用电结构和用电方式^[15]。实时电价更新周期较分时电价更短,可以为 1 h 或更短,能够有效传达电价信号,引导用户改变用电行为,响应系统运行状态变化。因此,针对 ADN,本文通过实时电价引导用户调节负荷响应 DG 出力变化,有效提升 DG 消纳水平,实现 ADN 全局能量管理优化。

用户的响应行为描述是制定考虑 DR 调度策略的基础,本文选用基于需求弹性的用户响应模型。用户在不同电价下的响应公式及响应约束如下:

$$\varepsilon_{jt} = \frac{[(L_{t,jt}^{\varphi} + L_{d,jt}^{\varphi}) - L_{t,jt}^{\varphi}]/L_{t,jt}^{\varphi}}{(\rho_{jt} - \rho_{ref,jt})/\rho_{ref,jt}} - \quad (1)$$

$$L_{d,jt}^{\varphi,max} \leq L_{d,jt}^{\varphi} \leq L_{d,jt}^{\varphi,max} \quad (2)$$

式中: $\varphi \in \{A, B, C\}$ 为 ABC 三相模型; ε_{jt} 为第 t 时段节点 j 的负荷需求自弹性系数,反映了用户的电力

收稿日期:2017-03-04;修回日期:2017-04-10

基金项目:国家电网公司科技项目(5210EF17001C);国网江苏省电力公司科技项目(J2016018, J2017038)

消费需求对电价变动的敏感程度,一般为已知参数; $L_{i,j}^{\varphi}$ 为第 t 时段节点 j 的负荷预测值; $L_{d,j}^{\varphi}$ 为第 t 时段节点 j 在不同电价时的响应负荷变化功率; ρ_{jt} 为第 t 时段节点 j 的电价; $\rho_{\text{ref},jt}$ 为参考电价,具体计算方法参考文献[16]; $L_{d,j}^{\varphi,\text{max}}$ 为节点 j 的用户最大响应容量。根据式(1)可以得到价格型 DR 的负荷变化功率与电价关系,如图 1 所示。

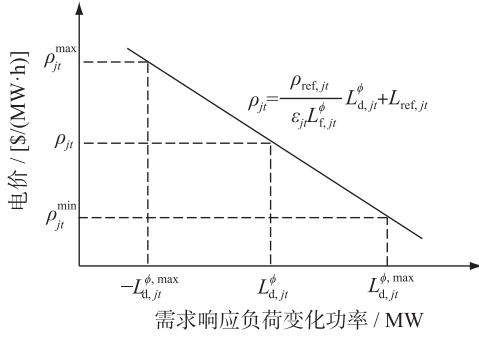


图 1 价格型 DR 的负荷变化功率与电价关系

Fig.1 Relationship between the DR load change and price

参考文献[16],电力公司在第 t 时段节点 j 的售电收入 $f(L_{i,jt}^{\varphi} + L_{d,jt}^{\varphi})$ 的计算公式如下:

$$f(L_{i,jt}^{\varphi} + L_{d,jt}^{\varphi}) = \frac{\rho_{\text{ref},jt}}{2\varepsilon_{jt} L_{i,jt}^{\varphi}} (L_{i,jt}^{\varphi} + L_{d,jt}^{\varphi})^2 + \left(\frac{\varepsilon_{jt} - 1}{\varepsilon_{jt}} \right) \rho_{\text{ref},jt} (L_{i,jt}^{\varphi} + L_{d,jt}^{\varphi}) \quad (3)$$

由式(3)可以看出, $f(L_{i,jt}^{\varphi} + L_{d,jt}^{\varphi})$ 为 DR 负荷 ($L_{i,jt}^{\varphi} + L_{d,jt}^{\varphi}$) 的二次凸函数,一般可采用逐步线性化的方法近似处理,其线性化的表达式如下^[17]:

$$f(L_{i,jt}^{\varphi} + L_{d,jt}^{\varphi}) = \sum_{m=1}^{NM} \rho_{mjt} d_{mjt}^{\varphi} \quad (4)$$

$$L_{i,jt}^{\varphi} + L_{d,jt}^{\varphi} = \sum_{m=1}^{NM} d_{mjt}^{\varphi} \quad (5)$$

式中: NM 为线性化后的分段数目; 决策变量 d_{mjt}^{φ} 为第 t 时段节点 j 的第 m 段的负荷功率,并满足 $0 \leq d_{mjt}^{\varphi} \leq D_{mjt}^{\varphi}$ ($\forall m \in NM$), D_{mjt}^{φ} 为第 m 段的最大负荷功率; ρ_{mjt} 为相应的第 m 分段电价,并考虑到线性化后前分段负荷必需达到上限后方能考虑后续分段负荷,因此 ρ_{mjt} 满足 $\rho_{1jt} \geq \rho_{2jt} \geq \dots \geq \rho_{NMjt}$ 。

2 有功-无功协调的动态经济调度模型

2.1 目标函数

ADN 的动态优化运行一般以调度周期内的网络损耗最小作为目标函数^[14]。但本文引入价格型 DR 后,需要从社会福利^[17]角度考虑修改该目标函数。社会福利可通过售电收入减去配变关口购电成本获得。因此,本文以最大化社会福利为目标函

数,具体表示为:

$$\max \left\{ \sum_{t=1}^{NT} \sum_{\varphi=A}^C \sum_{l=1}^{NL} \sum_{m=1}^{NM} \rho_{mjt} d_{mjt}^{\varphi} \Delta t - \sum_{t=1}^{NT} \sum_{\varphi=A}^C \rho_{0t} P_{0t}^{\varphi} \Delta t \right\} \quad (6)$$

式中: NT 为优化调度的总时段数目; NL 为系统负荷节点数目; P_{0t}^{φ} 为第 t 时段从根节点流入本级配电网的各相有功功率; ρ_{0t} 为配变关口购电电价; Δt 为调度周期时间间隔。

2.2 约束条件

AND 动态优化运行的约束条件一般包括三相潮流方程、系统运行安全约束、配变关口功率约束、储能装置运行约束以及无功补偿装置运行约束等,具体分析如下。

(1) DistFlow 支路潮流形式的三相辐射状配电网潮流约束^[14]。对于电网中的节点 j ,有:

$$\sum_{i \in u(j)} (P_{ijt}^{\varphi} - r_{ij}^{\varphi} \tilde{I}_{ijt}^{\varphi}) = \sum_{k \in v(j)} P_{jkt}^{\varphi} + P_{jt}^{\varphi} \quad (7)$$

$$\sum_{i \in u(j)} (Q_{ijt}^{\varphi} - x_{ij}^{\varphi} \tilde{I}_{ijt}^{\varphi}) = \sum_{k \in v(j)} Q_{jkt}^{\varphi} + Q_{jt}^{\varphi} \quad (8)$$

$$P_{jt}^{\varphi} = P_{jt}^{\varphi,G} + P_{jt}^{\varphi,d} - P_{jt}^{\varphi,c} - \sum_{m=1}^{NM} d_{mjt}^{\varphi} \quad (9)$$

$$Q_{jt}^{\varphi} = Q_{jt}^{\varphi,G} + Q_{jt}^{\varphi,\text{SVC}} + Q_{jt}^{\varphi,\text{CB}} - Q_{jt}^{\varphi,L} \quad (10)$$

对于电网中支路 ij ,有:

$$\tilde{U}_{jt}^{\varphi} = \tilde{U}_{it}^{\varphi} - 2(r_{ij}^{\varphi} P_{ijt}^{\varphi} + x_{ij}^{\varphi} Q_{ijt}^{\varphi}) + [(r_{ij}^{\varphi})^2 + (x_{ij}^{\varphi})^2] \tilde{I}_{ijt}^{\varphi} \quad (11)$$

标准二阶锥形式:

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ijt}^{\varphi} \\ 2Q_{ijt}^{\varphi} \\ \tilde{I}_{ijt}^{\varphi} - \tilde{U}_{it}^{\varphi} \end{array} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ijt}^{\varphi} + \tilde{U}_{it}^{\varphi} \quad (12)$$

式中:集合 $u(j)$, $v(j)$ 分别为电网中以 i, j 为首端节点的支路的末端节点的集合; $\tilde{I}_{ijt}^{\varphi}$ 为支路 ij 电流幅值 I_{ijt}^{φ} 的平方; \tilde{U}_{it}^{φ} 为节点 i 电压幅值 U_{it}^{φ} 的平方; P_{ijt}^{φ} 和 Q_{ijt}^{φ} 分别为支路 ij 首端三相有功功率和无功功率; P_{jt}^{φ} 和 Q_{jt}^{φ} 分别为节点 j 的有功功率和无功功率净注入值; $P_{jt}^{\varphi,G}$, $P_{jt}^{\varphi,d}$, $P_{jt}^{\varphi,c}$, $\sum_{m=1}^{NM} d_{mjt}^{\varphi}$ 分别为节点 j 上所连接的 DG 有功功率、ESS 放电功率、ESS 充电功率、负荷有功功率; $Q_{jt}^{\varphi,G}$, $Q_{jt}^{\varphi,\text{SVC}}$, $Q_{jt}^{\varphi,\text{CB}}$, $Q_{jt}^{\varphi,L}$ 分别为节点 j 上所连接的 DG 无功功率、SVC 连续补偿功率、分组投切电容器 CB 的离散补偿功率、负荷无功功率; x_{ij}^{φ} , r_{ij}^{φ} 分别为支路 ij 的电抗和电阻; $\|\cdot\|_2$ 为 2-范数。

(2) 系统运行安全约束。

$$\tilde{U}_{i,\text{min}}^{\varphi} \leq \tilde{U}_{it}^{\varphi} \leq \tilde{U}_{i,\text{max}}^{\varphi} \quad (13)$$

$$\tilde{I}_{ij}^{\varphi} \leq \tilde{I}_{ij,\max}^{\varphi} \quad (14)$$

式中: $\tilde{U}_{i,\max}^{\varphi}$, $\tilde{U}_{i,\min}^{\varphi}$ 分别为节点 i 电压幅值上下限值的平方; $\tilde{I}_{ij,\max}^{\varphi}$ 为支路 ij 电流幅值上限值的平方。

(3) 配变关口功率约束。为了抑制 ADN 的功率波动对输电网造成的影响,需要将配电网根节点的关口交换功率控制在某一范围,即:

$$P_{0t}^{\varphi,\min} \leq P_{0t}^{\varphi} \leq P_{0t}^{\varphi,\max} \quad (15)$$

$$Q_{0t}^{\varphi,\min} \leq Q_{0t}^{\varphi} \leq Q_{0t}^{\varphi,\max} \quad (16)$$

式中: P_{0t}^{φ} , Q_{0t}^{φ} 为第 t 时段从根节点流入本级配电网的各相有功和无功功率; $P_{0t}^{\varphi,\max}$, $Q_{0t}^{\varphi,\max}$, $P_{0t}^{\varphi,\min}$, $Q_{0t}^{\varphi,\min}$ 为第 t 时段调控中心设定的各相关口有功和无功功率交换的上界和下界。

(4) 储能装置 ESS 运行约束。本文提出的有功无功协调动态优化模型为提高 DG 的并网能力,充分利用配电网中的可再生能源,引入了储能装置 ESS,其模型如下:

$$E_{it}^{\varphi,b} + P_{it}^{\varphi,c} \eta^c \Delta t - \frac{P_{it}^{\varphi,d}}{\eta^d} \Delta t = E_{i,t+1}^{\varphi,b} \quad (17)$$

$$E_{i,\max}^b \times 20\% \leq E_{it}^{\varphi,b} \leq E_{i,\max}^b \times 90\% \quad (18)$$

$$0 \leq P_{it}^{\varphi,c} \leq P_{i,\max}^{\varphi,c} D_{it}^{\varphi,c} \quad (19)$$

$$0 \leq P_{it}^{\varphi,d} \leq P_{i,\max}^{\varphi,d} D_{it}^{\varphi,d} \quad (20)$$

$$D_{it}^{\varphi,c} + D_{it}^{\varphi,d} \leq 1 \quad (21)$$

式中:式(17)和(18)表示 ESS 的电量约束, $E_{it}^{\varphi,b}$ 为第 t 时段第 i 节点上所连接的 ESS 的电量, $P_{it}^{\varphi,c}$ 和 $P_{it}^{\varphi,d}$ 分别为相应的 ESS 的充电率和放电功率; η^c 和 η^d 分别为充放电效率,且每一调度周期初始时段和下一周期的初始时段 ESS 的电量相等。式(19)和(20)为 ESS 的充电和放电功率上下限约束, $P_{i,\max}^{\varphi,c}$ 和 $P_{i,\max}^{\varphi,d}$ 分别为 ESS 的充放电功率上限。 $D_{it}^{\varphi,c}$ 和 $D_{it}^{\varphi,d}$ 分别表示第 t 时段 ESS 是否处于充电和放电状态的 0-1 离散决策变量,式(21)表明 ESS 在一个时段内不能同时处于充电和放电状态。

(5) 离散无功补偿装置运行约束。受到生产制造技术和设备使用寿命的限制,在一个调度周期内 CB 的操作次数有严格限制,且每一次投切都是成组操作,即 CB 的运行应该满足如下约束特性:

$$Q_{it}^{\varphi,\text{CB}} = N_{it}^{\text{CB}} Q_{i,\text{step}}^{\varphi,\text{CB}} \quad (22)$$

$$0 \leq N_{it}^{\text{CB}} \leq N_{\max}^{\text{CB}} \quad N_{it}^{\text{CB}} \in \{\text{integers}\} \quad (23)$$

$$\sum_{t=1}^{NT-1} B_{it}^{\text{CB}} = B_{\text{lim}}^{\text{CB}} \quad (24)$$

$$B_{it}^{\text{CB}} \times 1 \times Q_{i,\text{step}}^{\varphi,\text{CB}} \leq |Q_{i,t+1}^{\varphi,\text{CB}} - Q_{it}^{\varphi,\text{CB}}| \leq B_{it}^{\text{CB}} N_{\max}^{\text{CB}} Q_{i,\text{step}}^{\varphi,\text{CB}} \quad (25)$$

式中: $Q_{it}^{\varphi,\text{CB}}$ 为第 i 节点上所连接的 CB 在第 t 时段

各相的实际投运补偿功率; $Q_{i,\text{step}}^{\varphi,\text{CB}}$ 为每一组补偿功率;整数变量 N_{it}^{CB} 为优化投运组数;整数 N_{\max}^{CB} 为每个电容器组的最大补偿组数; B_{it}^{CB} 为 0-1 离散决策变量。式(25)表示当 B_{it}^{CB} 为 0 时, $Q_{i,t+1}^{\varphi,\text{CB}} - Q_{it}^{\varphi,\text{CB}}$ 为 0,即两个不同时刻补偿功率不变,电容器组不操作;但当 B_{it}^{CB} 为 1 时, $Q_{i,t+1}^{\varphi,\text{CB}} - Q_{it}^{\varphi,\text{CB}}$ 可以在 $[-N_{\max}^{\text{CB}} Q_{i,\text{step}}^{\varphi,\text{CB}}, -Q_{i,\text{step}}^{\varphi,\text{CB}}] \cup [Q_{i,\text{step}}^{\varphi,\text{CB}}, N_{\max}^{\text{CB}} Q_{i,\text{step}}^{\varphi,\text{CB}}]$ 区间内优化取得离散投运功率; $B_{\text{lim}}^{\text{CB}}$ 则表示在一天 T 个调度周期内 CB 的动作次数限制,满足其实际运行要求。

(6) 连续无功补偿装置运行约束。

$$Q_{i,\min}^{\varphi,\text{SVC}} \leq Q_{it}^{\varphi,\text{SVC}} \leq Q_{i,\max}^{\varphi,\text{SVC}} \quad (26)$$

式中: $Q_{i,\max}^{\varphi,\text{SVC}}$ 和 $Q_{i,\min}^{\varphi,\text{SVC}}$ 分别为连续无功补偿装置(SVC 等)的各相可调无功功率的上下限值; $Q_{it}^{\varphi,\text{SVC}}$ 为节点 i 上所连接的 SVC 的各相优化调节功率。

(7) DG 出力约束。

$$0 \leq P_{gt}^{\varphi,G} \leq \bar{P}_{gt}^{\varphi,G} \quad (27)$$

$$Q_{gt}^{\varphi,G} = P_{gt}^{\varphi,G} \tan \theta_g^{\varphi,G} \quad (28)$$

式中:将 DG 设定为定功率因数运行方式, $\bar{P}_{gt}^{\varphi,G}$ 为第 t 时段 DG 预测的有功功率; $\theta_g^{\varphi,G}$ 为 DG 的功率因数角。

(8) 负荷无功功率约束。

$$Q_{it}^{\varphi,L} = \left(\sum_{m=1}^{NM} d_{mjt}^{\varphi} \right) \tan \theta_1^{\varphi,L} \quad (29)$$

式中:假设负荷为 PQ 类型, $\theta_1^{\varphi,L}$ 为负荷的功率因数角。

2.3 模型求解

上述决策模型的优化控制变量包括需求响应负荷功率、ESS 充放电功率、DG 功率、SVC 补偿功率、CB 投运功率及各设备的操作时刻等,因此是一个包含连续变量和离散变量的 ADN 三相多时段优化模型。该模型通过引入 \tilde{U}_{it}^{φ} 和 \tilde{I}_{ij}^{φ} 变量,将本质上的混合整数非凸非线性规划问题进行二阶锥松弛,转化为混合整数二阶锥规划问题,可通过商业优化软件对该问题进行求解。

3 算例仿真与分析

3.1 扩展的 IEEE 33 节点三相测试系统

本文采用的 IEEE 33 节点三相辐射状配电系统共有 33 个节点、37 条支路、5 个环,开环运行,根节点电压 12.66 kV,并将 DG、SVC、CB、ESS 加入其中,如图 2 所示。基本配置参数为:节点 18 和 31 连接 2 个光伏 PV,装机容量 300 kW, DG 和负荷的功率因数设为 0.95,三相独立可调。设节点 25 连接 SVC,无功补偿区间为 -300~300 kvar,三相独立可调;节

点 5 和 22 连接 2 个分组投切电容器组 CB, 每个调度周期内允许操作 5 次, 每相有 4 组, 每组的补偿功率为 25 kvar, 即每相的补偿功率为 0~100 kvar 共 5 种状态; 节点 16 和 33 连接 2 个储能装置 ESS, 总充放电功率上限为 240 kW, 每相设为 80 kW, 总电量上限为 1200 kW·h, 充放电效率均为 93.5%。

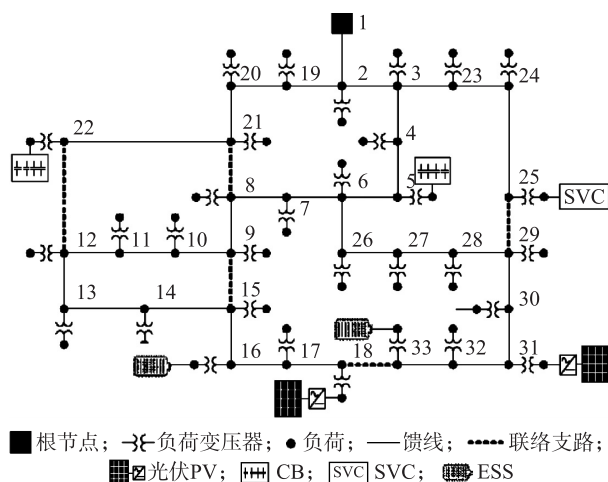


图 2 扩展 IEEE 33 节点测试系统

Fig.2 Modified IEEE 33-bus test system

系统日内 12 时段的负荷曲线和光照强度曲线, 利用美国国家可再生能源实验室 NREL 的 Homer 软件, 根据我国西北某市经纬度产生。考虑到配电系统涵盖区域面积不大, 且为结果分析简便, 所有的光伏 PV 均采用相同的光照曲线, 负荷节点采用相同的负荷曲线。将文献[14]中给出的负荷设定为系统负荷曲线的峰值负荷, 将光伏 PV 的装机容量对应为系统光照曲线的峰值光照点。

假设所有节点负荷用户均参与 DR, 整个调度时段内参考电价 $\rho_{ref,lt} = 0.05$ $\$/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 弹性系数 $\varepsilon_{lt} = -0.2$, 用户最大响应容量 $L_{d,lt}^{\varphi, \max} = 20\% L_{i,lt}^{\varphi}$, 并将负荷划分 10 个分段。

在 MATLAB 中调用 CPLEX 软件包编制相关程序对测试系统的线性优化模型进行求解。当对偶间隙取 0.01% 时, 在主频 2.4 GHz Intel CPU、8 GB 内存的 PC 上计算所需时间约为 3.6 s。

3.2 与传统三相 ADN 有功无功协调动态经济调度模型比较分析

在传统三相 ADN 有功无功协调动态经济调度模型中, 考虑到 DG 出力的波动与负荷的变化不完全匹配, 配电网中 ESS、关口功率、节点电压、支路电流等受限的情况下, 将会采取弃风、弃光、切负荷策略以满足硬性约束。

与传统方法[14]相比, 本文考虑价格型 DR 的方法可以通过价格型 DR 的调节作用, 增大节点负

荷功率, 以提高系统消纳大规模光伏 PV 发电的水平并增大社会福利。图 3 为两种方法的光伏 PV1 和 PV2 出力比较, 从图中可以看出:

(1) 在第 1~2 和 11~12 时段, 配电系统的负荷水平较低, 而光伏出力较大, 由于配电网中 ESS 和配变关口不具备足够的向下调节容量, 传统方法不得不通过弃光, 以保证系统安全约束在允许光伏出力内得到满足。而本文方法通过价格型 DR 增大该调度时段内的系统负荷, 减小了弃光功率, 并增大了光伏允许出力大小。

(2) 在第 7~9 时段, 配电系统具备足够的可调节容量。但在该调度时段内, 受限于系统网络安全约束, 传统方法的光伏允许出力小于光伏预测出力。而本文方法基于 DR 的调节作用, 通过增大节点 18、31 的负荷, 以减小节点 18 和 33、18 和 17、30 和 31、31 和 32 之间的光伏送出馈线的负载, 从而增大了光伏电站的光伏允许出力大小。

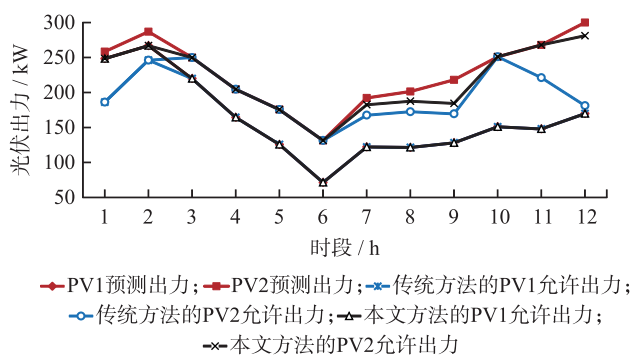


图 3 本文方法与传统方法的光伏允许出力比较

Fig.3 Comparison of allowable power output of PV between the proposed method and conventional method

可见, 价格型 DR 可以作为 ESS 调节能力的有效补充, 配合光伏出力变化, 缓解光伏不确定性影响, 提升系统消纳大规模 DG 的水平。

表 1 列出了两种方法得到的购电成本和社会福利。由表 1 可见, 考虑价格型 DR 后, 系统通过减少弃光功率减小了配变关口购电成本, 并且系统负荷增大而增加了售电收入, 最终提高了社会福利。

表 1 本文方法与传统方法的社会福利比较

Table 1 Comparison of social welfare between the proposed method and conventional method $\$/$

项目	本文方法	传统方法
购电成本	24 574.72	28 004.74
售电收入	107 479.36	98 083.33
社会福利	82 904.64	70 078.59

4 结论

为了提高 ADN 的 DG 消纳水平, 本文将价格型

DR 引入现有 ADN 的多时段优化运行调度模型, 构建了三相 ADN 有功-无功协调动态经济调度模型, 并提出了基于混合整数二阶锥规划的模型求解方法。对扩展的 IEEE 33 节点测试系统进行仿真分析, 验证了所提出模型及算法的有效性和优越性。仿真分析表明该模型可通过 DR 负荷调节的日内多时段优化, 达到配电网节能降损、保证馈线负载、电压不越限、提高 DG 消纳水平的目的, 实现 ADN 全局能量管理优化。

本文建立的模型是集中式经济调度模型, 该模型仍存在处理信息海量、模型维护困难、求解问题规模庞大、单点故障失效等不足, 因此未来需要进一步研究考虑价格 DR 的 ADN 分布式经济调度, 实现 DG 的即插即用。

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] 蒲天骄, 陈乃仕, 王晓辉, 等. 主动配电网多源协同优化调度架构分析及应用设计 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 17-23.
PU Tianjiao, CHEN Naishi, WANG Xiaohui, et al. Application and architecture of multi-source coordinated optimal dispatch for active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 17-23.
- [3] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14.
- [4] WU W C, ZHANG B M, LO K L. Capacitors dispatch for quasi minimum energy loss in distribution systems using a loop-analysis based method [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2010, 32(6): 543-550.
- [5] GABASH A, LI P. Active-reactive optimal power flow in distribution networks with embedded generation and battery storage [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2026-2035.
- [6] GAYME D, TOPCU U. Optimal power flow with large-scale energy storage integration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 709-717.
- [7] GILL S, KOCKAR I, AULT G W. Dynamic optimal power flow for active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 121-131.
- [8] DARATHA N, DAS B, SHARMA J. Coordination between OLTC and SVC for voltage regulation in unbalanced distribution system distributed generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 289-299.
- [9] CHENG C S, SHIRMOHAMMADI D. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 671-679.
- [10] 车仁飞, 李仁俊. 一种少环配电网三相潮流计算新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 75-80.
CHE Renfei, LI Renjun. A new three-phase power flow method for weakly meshed distribution systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 75-80.
- [11] KHUSHALANI S, SOLANKI J M, Schulz N N. Development of three-phase unbalanced power flow using PV and PQ models for distributed generation and study of the impact of DG models [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1019-1025.
- [12] BRUNO S, LAMONACA S, ROTONDO G, et al. Unbalanced three-phase optimal power flow for smart grids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4504-4513.
- [13] FERREIRA P D F, CARVALHO P M S, FERREIRA L A F M, et al. Distributed energy resources integration challenges in low-voltage networks: voltage control limitations and risk of cascading [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 82-88.
- [14] 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.
- [15] 艾欣, 刘晓. 基于需求响应的风电消纳机会约束模型研究 [J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(3): 17-22.
AI Xin, LIU Xiao. Chance constrained model for wind power usage based on demand response [J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(3): 17-22.
- [16] JIN S, BOTTERUD A, RYAN S M. Impact of demand response on thermal generation investment with high wind penetration [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2374-2383.
- [17] WANG Q, WANG J, GUAN Y. Stochastic unit commitment with uncertain demand response [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 562-563.

作者简介:



张刘冬

张刘冬(1987—),男,江苏如皋人,东南大学博士后,主要研究方向为电力系统经济调度,主动配电网,电力系统自动化(E-mail: zldon_1987@126.com);

丁昊(1987—),男,江苏盐城人,工程师,从事电力系统与保护、电网项目管理等工作(E-mail: dinghl@js.sgcc.com.cn);

袁晓冬(1979—),男,江苏宜兴人,硕士,高级工程师,从事电能质量分析,新能源发电,主动配电网研究工作(E-mail: lannyuan@hotmail.com);

曾飞(1984—),男,江西赣州人,硕士,工程师,从事电力系统继电保护,电力系统自动化研究工作(E-mail: 15105168878@163.com)。

(下转第 42 页)

Improved Thevenin Equivalent Impedance Calculating Method for Hybrid Simulation

YANG Yang¹, SUN Jing², YANG Peidong³, XIAO Xiangning⁴, PAN Mingming⁵

(1. State Grid Hebei Economic Technology Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. State Grid Shijiazhuang Power Supply Company, Shijiazhuang 050000, China;

3. State Grid Xingtai Power Supply Company, Xingtai 054001, China; 4. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources North China Electric Power University (NCEPU), Beijing 102206, China;

5. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: As the Thevenin equivalent impedance parameter which is deviated from stability-type simulation data can hardly reflect the electromagnetic characteristics of the electromechanical-side system after fault, an improved calculating method of Thevenin equivalent impedance of electromechanical-side system for electromechanical-electromagnetic hybrid transient simulation based on electromagnetic transient simulation model is proposed. The Thevenin equivalent impedance parameter is achieved through setting two three phase line to ground faults on the interface bus in the full-electromagnetic transient simulation model and solving the primary time constant equation group in which the primary time constant is based on a calculating method which is not affected by every harmonic component. Compared with the equivalent impedance calculated by the traditional method which calculates the impedance based on the stability-type simulation data and through unit current injection method, the equivalent impedance calculated with the method proposed in this paper can reflect the electromagnetic characteristics more accurately, thus improving the simulation accuracy of electromechanical-electromagnetic hybrid transient simulation during and after fault.

Key words: equivalent impedance; primary time constant; electromechanical-electromagnetic; hybrid simulation; accuracy

(编辑 徐林菊)

(上接第 35 页)

Active and Reactive Power Coordinated Economic Dispatch of Active Distribution Networks with Consideration of Price-based Demand Response

ZHANG Liudong¹, DING Hao², YUAN Xiaodong¹, ZENG Fei¹, LI Qiang¹, YUAN Yubo¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch, Nanjing 211106, China)

Abstract: With increasing penetration of distributed generation (DG), the overload of feeder lines and out of voltage limits will happen in distribution networks, which may limit the penetration of DG. Demand response can promote large-scale DG accommodation by utilizing demand side resources to participate in active distribution networks (ADN) scheduling. Therefore, a price-based demand response model is introduced to the existing multi-period optimization model for ADN, an active and reactive power coordinated economic dispatch model of three-phase ADN is developed and its solution method based on mixed integer second-order cone programming is proposed in this paper. The proposed model can reduce loss and ensure that the overload of feeder lines and out of voltage limits will not appear via optimizing the operation of DG, energy storage system and VAR compensation as well as demand response load. Simulation studies on the modified IEEE 33-bus system are presented to verify the effectiveness and advantage of the proposed model.

Key words: active distribution networks; distributed generation; price-based demand response; economic dispatch; mixed integer second-order cone programming

(编辑 刘晓燕)