

文章编号:1671-6833(2019)01-0032-06

基于二阶锥规划的主动配电网动态无功优化

章 健¹, 熊壮壮¹, 王明东¹, 朱永胜²

(1. 郑州大学 产业技术研究院, 河南 郑州 450001; 2. 中原工学院 电子信息学院, 河南 郑州 450007)

摘 要: 为了提高分布式能源的利用率,降低网损,减少电压偏差,建立了包含储能、分布式电源、分组投电容器组,有载调压分接头以及静止无功补偿器等多种主动管理装置的配电网有功无功协调的动态无功优化多目标模型.使用层次分析法将多目标转化为单目标,采用 Big-M 方法将模型线性化,利用松弛理论松弛凸化为二阶锥规划的形式.在改进的 IEEE 33 节点上验证模型的有效性和合理性,利用 Cplex 来求解出各个主动管理装置的投切容量与时刻,证明了所建模型的合理性.

关键词: 主动配电网; 二阶锥规划; 多目标优化; 无功优化

中图分类号: TM71 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2019.01.003

0 引言

随着分布式电源 (distributed energy resources, DER) 的渗透率不断提高,分布式电源的不确定性给传统配电网带来了诸多挑战,如接入点电压升高、系统双向潮流、短路电流升高、分布式电源的消纳等^[1]. 由此主动配电网 (active distribution network, ADN) 概念应运而生,主动配电网是通过使用灵活的网络拓扑结构来管理潮流,以便对局部的 DER 进行主动控制和主动管理的配电系统^[2]. 未来的配电网是同时含有多种主动管理装置的配电网,例如风电、光电、储能系统 (energy storage system, ESS)、分组投切电容器组 (capacitors banks, CB)、静止无功补偿器 (static VAR compensation, SVC)、有载调压变压器 (onload tap changer, OLTC),如何制定这些主动管理装置的控制策略关系到主动配电网优化运行.

由于主动配电网优化运行的研究中含有很多离散变量和整数变量,以及配电网潮流等式的非凸,使得求解过程比较困难,属于非确定性多项式 (non-deterministic polynomial) 问题,当前许多智能算法如粒子群算法^[3]、遗传算法^[4]、进化算法^[5]确实能求解这些非凸问题. 但是,智能算法运用到主动配电网无功优化中,容易陷入局部最优解且求解速度很慢. 文献[6]建立了以网损为

目标的主动配电网随机无功优化模型,并用粒子群算法来求解,且只是将网损作为单目标;文献[7]建立了考虑网损、电压偏差的配电网随机无功优化模型,但其没有考虑储能系统. 文献[8-9]考虑到集中调控的不可靠性,将配电网进行分区来进行无功优化,使用交替方向乘子法来进行求解,但考虑的无功控制装置仅仅只限于 DG;文献[10-11]利用二阶锥规划 (second order cone programming, SOCP) 来求解无功优化问题,但目标函数仅仅为网损,比较单一.

针对以上问题,笔者考虑 DG、ESS、CB、SVC、OLTC 等主动管理装置,以弃风、弃光、网损、电压偏差为目标函数,建立了配电网多目标无功优化模型,然后利用层次分析法将多目标函数转化为单目标函数,通过对模型进行线性化处理和松弛凸化为二阶锥 (SOCP) 的形式,再用商业求解器 Cplex 来进行求解,从而制定出这些主动管理装置的动态投切策略.

1 主动配电网建模

1.1 主动管理装置的建模

1.1.1 储能装置建模

通常情况下储能装置具有削峰填谷、改善电压质量等作用. 笔者主要考虑电量平衡限制、电量剩余限制、充电限制,忽略储能装置的电量随时间

收稿日期:2018-09-29;修订日期:2018-11-22
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61873292);河南省科技攻关项目(172102210012)
作者简介:章健(1963—),男,河南郑州人,郑州大学教授,博士,主要从事电力系统运行与分析和电力系统辨识等方面的研究,E-mail:zhangjian63@zzu.edu.cn.

的损失,其模型为:

$$E_{j,t+1} = E_{j,t} + \eta_{ch,j} P_{ch,j,t} \Delta t - P_{dech,j,t} / \eta_{dech,j} \Delta t, \quad (1)$$

$$E_{j,max} \cdot 20\% \leq E_{j,t} \leq E_{j,max} \cdot 90\%, \quad (2)$$

$$M_{ch,j,t} + M_{dech,j,t} \leq 1, \quad (3)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ch,j,t} \leq P_{ch,j,max} M_{ch,j,t}; \\ 0 \leq P_{dech,j,t} \leq P_{dech,j,max} M_{dech,j,t}, \end{cases} \quad (4)$$

式中: $E_{j,t}$ 为 t 时刻第 j 节点上所连接的电量; $P_{ch,j,t}$ 、 $\eta_{ch,j}$ 、 $P_{dech,j,t}$ 、 $\eta_{dech,j}$ 分别为第 j 节点上连接储能装置的充电功率、充电效率、放电功率、放电效率; Δt 为调度时间间隔; $E_{j,max}$ 为储能装置的最大容量; $M_{ch,j,t}$ 、 $M_{dech,j,t}$ 为 0、1 变量, 保证充放电不能同时进行; $P_{ch,j,max}$ 、 $P_{dech,j,max}$ 分别为充放电的最大功率. 式(1)为电量平衡限制; 式(2)为了保证储能装置的寿命设定的电池剩余限制; 式(3)为储能装置的充放电限制, 保证储能装置在调度周期内的某一时刻只能处于充电、放电和不充电也不放电的 3 种状态中的一种; 式(4)为充放电的功率限制.

1.1.2 无功装置建模

(1) 连续的无功调节.

$$Q_{j,min}^{SVC} \leq Q_{j,t}^{SVC} \leq Q_{j,max}^{SVC}. \quad (5)$$

(2) 离散的无功调节. 离散的无功调节主要是分组投切电容器组.

$$Q_{j,t}^{CB} = N_{j,t}^{CB} Q_{j,step}^{CB}, \quad (6)$$

$$N_{j,t}^{CB} \leq N_{j,max}^{CB}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{T-1} D_{j,t}^{CB} \leq D_{j,lim}^{CB}; \\ D_{j,t}^{CB} \in \{0, 1\}, \end{cases} \quad (8)$$

$$-D_{j,t}^{CB} N_{j,max}^{CB} \leq N_{j,t+1}^{CB} - N_{j,t}^{CB} \leq D_{j,t}^{CB} N_{j,max}^{CB}, \quad (9)$$

式中: $Q_{j,max}^{SVC}$ 、 $Q_{j,min}^{SVC}$ 分别为 SVC 发出无功功率的上下限; $Q_{j,t}^{SVC}$ 、 $Q_{j,t}^{CB}$ 分别为接在 j 节点上的 SVC、CB 在 t 时刻时的无功功率; $N_{j,t}^{CB}$ 、 $N_{j,max}^{CB}$ 分别为 CB 的投切组数和最大投切组数; $D_{j,t}^{CB}$ 为调度周期期间 CB 投切组数是否改变, 改变为 1, 不改变为 0. 式(5)为 SVC 投切的上下限约束; 式(6)为 CB 的投切容量与投切组数的约束; 式(7)和(8)分别为 CB 的投切组数和投切次数限制约束.

1.1.3 OLTC 的建模

$$U_{i,t} = n_{ij,t} U_{j,t}; \quad (10)$$

$$n_{ij,t} = n_{ij,0} + K_{ij,t} \Delta n_{ij}; \quad (11)$$

$$-K_{ij,max} \leq K_{ij,t} \leq K_{ij,max}; \quad (12)$$

$$-2K_{ij,max} D_{j,t}^{olte} \leq K_{ij,t+1} - K_{ij,t} \leq 2K_{ij,max} D_{j,t}^{olte}; \quad (13)$$

$$\sum_{t=1}^{T-1} D_{j,t}^{olte} = 1, D_{j,t}^{olte} \in \{0, 1\}, \quad (14)$$

式中: $K_{ij,max}$ 为 OLTC 触头最大调节位置; $K_{ij,t}$ 表

示 t 时刻接在 j 节点上 OLTC 触头的位置; n_{ij} 为 i 、 j 节点之间的变比; $n_{ij,t}$ 、 $n_{ij,0}$ 分别为 t 时刻和 0 时刻的变比, $D_{j,t}^{olte}$ 为二进制变量, 为 1 说明抽头位置改变, 为 0 说明抽头位置不改变. 式(10)为高低侧电压之间与变比的关系; 式(11)为变比与 OLTC 抽头的位置与变比之间的关系; 式(12)为 OLTC 抽头的最大位置限制; 式(13)和式(14)为调度周期内 OLTC 抽头的调限制.

1.2 目标函数建模

笔者建立多目标模型, 分别考虑网损、弃风和弃光和电压偏差.

(1) 网损.

$$f_{loss} = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N R_{ij} I_{ij,t}^2 \Delta t. \quad (15)$$

(2) 弃风和弃光.

$$f_{cur} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{DG}} (P_{i,t}^{pre} - P_{i,t}^{DG}) \Delta t. \quad (16)$$

(3) 电压偏差. 笔者将电压限制在一定的区间范围内, 如果越界, 采取罚函数的形式进行惩罚, 具体表达式为:

$$f_u = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{node}} |U_{i,t}^2 - U_{ref}^2|, \quad (17)$$

式中: N_{node} 为电网中节点的个数; N 为支路的条数; R_{ij} 为 ij 支路的电阻; $I_{ij,t}$ 为 t 时刻的 ij 支路的电流; Δt 为调度周期间隔时间; N_{DG} 为 DG 的个数; $P_{i,t}^{pre}$ 、 $P_{i,t}^{DG}$ 分别为 i 节点 t 时刻 DG 预测功率和实际发出功率; $U_{i,t}$ 为 i 节点 t 时刻的电压; U_{ref} 为电网中的参考电压.

1.3 运行约束

1.3.1 功率平衡约束

目前在配电网优化控制策略制定中, 配电网潮流形式一般采用 Distflow 支路潮流^[10]形式. 其实质就是流入节点的功率与流出节点的功率平衡.

$$\begin{cases} \sum_{i \in \varphi(j)} [P_{ij,t} - R_{ij} I_{ij,t}^2] - \sum_{k \in \psi(j)} P_{jk,t} = P_{j,t}; \\ P_{j,t} = -P_{j,t}^{DG} - P_{dech,j,t} + P_{ch,j,t} + P_{j,t}^d, \end{cases} \quad (18)$$

$$U_{i,t}^2 - U_{j,t}^2 = -2(R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) I_{ij,t}^2, \quad (19)$$

$$\begin{cases} \sum_{i \in \varphi(j)} [Q_{ij,t} - X_{ij} I_{ij,t}^2] - \sum_{k \in \psi(j)} Q_{jk,t} = Q_{j,t}; \\ Q_{j,t} = -Q_{j,t}^{DG} - Q_{j,t}^{SVC} - Q_{j,t}^{CB} + Q_{j,t}^d, \end{cases} \quad (20)$$

$$I_{ij,t}^2 = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{U_{i,t}^2}, \quad (21)$$

式中: $\varphi(j)$ 是辐射电网中以 j 为末端节点的支路

首端节点集合; $\psi(j)$ 是以 j 为首端节点的支路的末端节点集合; $P_{ij,t}, Q_{ij,t}$ 为 i, j 支路的首端 t 时刻的有功和无功功率; $U_{i,t}, U_{j,t}$ 和 $I_{ij,t}$ 为 t 时刻 ij 节点的电压幅值和 i, j 支路电流幅值; R_{ij}, X_{ij} 为 i, j 支路的电阻和电抗. 式(18) 为有功平衡约束; 式(20) 是保证无功平衡; 式(19) 和(21) 是电压降平衡约束.

1.3.2 电压及电流上下限约束

$$U_{j,\min} \leq U_{j,t} \leq U_{j,\max}; \quad (22)$$

$$0 \leq I_{ij,t} \leq I_{ij,\max}, \quad (23)$$

式中: $U_{j,\min}, U_{j,\max}$ 为电压的上下界; $I_{ij,\max}$ 为电流最大值.

1.3.3 变电站关口约束

主动配电网的功率波动会对输电网的电能质量造成影响, 所以配变口交换功率应该控制在一定的范围内^[10].

$$\begin{cases} P_{0,\min} \leq P_{0,t} \leq P_{0,\max}; \\ Q_{0,\min} \leq Q_{0,t} \leq Q_{0,\max}, \end{cases} \quad (24)$$

式中: $P_{0,\max}, P_{0,\min}$ 为变电站节点的输出功率的上下界, $P_{0,t}$ 为从变电站节点流出的功率.

1.3.4 分布式电源约束

随着分布式电源的发展, 现在越来越多的 DG 可以进行无功调节, 对于 DG 无功方面的控制, 有恒功率和变功率控制, 笔者主要考虑恒功率的控制. θ 为功率因素角.

$$\begin{cases} 0 \leq P_{j,t}^{\text{DG}} \leq P_{j,t}^{\text{pre}}; \\ 0_{j,t}^{\text{DG}} = P_{j,t}^{\text{DG}} \tan \theta. \end{cases} \quad (25)$$

2 模型的转化

2.1 二阶锥模型

由于所建模型是大规模非凸非线性的混合整数规划问题, 现有的诸如智能算法容易陷入局部最优解, 二阶锥规划算法能良好地解决这些问题.

二阶锥的标准形式^[12]:

$$\min_{x_i} \{c^T x \mid Ax = b, x_i \in K, i = 1, 2, \dots, N\},$$

式中: 变量 $x \in R_N$; 系数常量 $b \in R_M$; $c \in R_N$; $A_{M \times N} \in R_{M \times N}$; K 为二阶锥或旋转二阶锥.

二阶锥:

$$K = \left\{ x_i \in R_N \mid y^2 \geq \sum_{i=1}^N x_i^2, y \geq 0 \right\}.$$

2.2 模型的锥化

令 $I_{ij,t}^2 = \tilde{I}_{ij,t} U_{i,t}^2 = \tilde{U}_{i,t}$, 将式(21) 松弛为:

$$\tilde{I}_{ij,t} \geq \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{\tilde{U}_{i,t}}, \quad (26)$$

然后将式(26) 化为(27).

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ \tilde{I}_{ij,t} - \tilde{U}_{i,t} \end{matrix} \right\| \leq \tilde{I}_{ij,t} + \tilde{U}_{i,t}. \quad (27)$$

对于目标函数 f_u 不满足二阶锥规划的模型, 必须对其进行处理:

$$\text{令 } G_{i,t} = |\tilde{U}_{i,t} - U_{\text{ref}}^2|,$$

添加如下附加约束^[13]:

$$\begin{cases} G_{i,t} \geq 0; \\ G_{i,t} \geq \tilde{U}_{i,t} - (U_{\max}^{\text{thr}})^2; \\ G_{i,t} \geq -\tilde{U}_{i,t} + (U_{\min}^{\text{thr}})^2, \end{cases} \quad (28)$$

式中: $U_{\min}^{\text{thr}}, U_{\max}^{\text{thr}}$ 为电压优化的最小值和最大值.

式(22) 和(23) 相应转化为:

$$\begin{cases} U_0 \underline{U} \leq \tilde{U}_{i,t} \leq U_0 \bar{U}; \\ 0 \leq \tilde{I}_{i,t} \leq \left(\frac{S_L}{U_0} \right)^2, \end{cases} \quad (29)$$

式中: U_0 为配电网的电压等级; \bar{U}, \underline{U} 为各节点电压的上下限; S_L 为线路的最大传输容量. 上述之前的约束经过变形后就变成了二阶锥约束的形式.

相应的式(10) 变成:

$$\tilde{U}_{i,t} = n_{ij}^2 \tilde{U}_{j,t}. \quad (30)$$

由于式(11) 的非线性, 可以处理成如下形式^[14]:

$$K_{ij,t} = \sum_{m=0}^{2K_{ij,\max}} [(m - K_{ij,\max}) B_{m,t}]; \quad (32)$$

$$\sum_{m=0}^{2K_{ij,\max}} B_{m,t} = 1, B_{m,t} \in \{0, 1\}; \quad (33)$$

$$\tilde{U}_{i,t} = \sum_{m=0}^{2K_{ij,\max}} [n_{ij,0} + (m - K_{ij,\max}) \Delta n_{ij}]^2 U_{j,t}^{\text{aux}}, \quad (34)$$

并添加如下约束:

$$U_{j,\min}^2 B_{m,t} \leq U_{j,t}^{\text{aux}} \leq U_{j,\max}^2 B_{m,t}; \quad (35)$$

$$U_{j,\min}^2 (1 - B_{m,t}) \leq \tilde{U}_{j,t} - U_{j,t}^{\text{aux}} \leq U_{j,\max}^2 (1 - B_{m,t}), \quad (36)$$

因此, 式(10) 和(11) 就线性化为(32)、(33)、(34)、(35)、(36).

2.3 目标函数的多目标处理

目前处理多目标模型的方法主要有: 将多目标转化为单目标来求解、帕累托前沿^[15]等方法. 笔者通过对多目标进行加权转化为单目标进行求解. 利用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)^[16]来确定系数.

$$F = w_1 f_{\text{loss}} + w_2 f_{\text{cur}} + w_3 f_u.$$

根据层次分析法算出来权重: $w_1 = 0.6250$,

$w_2 = 0.238\ 5, w_3 = 0.136\ 5$.

2.4 模型求解

经过上述线性化和锥化处理之后,潮流等式(18)~(20)也将变成线性式,如果不考虑整数变量,模型为二阶锥规划(SOCP)模型. 本文由于含有离散变量,无功优化的模型变成了混合整数二阶锥规划模型(mixed integer second order cone programming, MISOCP),一些商业软件能快速地求解这种模型,如 Cplex、Gurobi、Mosek.

3 算例分析

3.1 测试环境与算例

为了验证笔者所建的模型的正确性和有效性,在 Yalmip 上建模,在 MATLAB2016b 平台上采用 Cplex 12.7 求解器进行求解. 测试系统的硬件环境是英特尔 Pentium (R) J2900, 4 GB 内存, 64 位 windows 8 操作系统.

笔者在修改的 IEEE 33 节点上进行仿真计算. 图 1 为某地典型的分布式电源和负荷的日运行曲线,风机与光伏接入的位置如表 1 所示^[16]. ESS 的容量为 1 200 kVA,充放电功率为 240 kW·h,效率为 0.938 1. SVC 接在节点 25, 补偿范围为 -300~500 kvar,为了提高分布式电源的利用率,将渗透率分别设置为 25%、50%、75%、100%,观察节点电压是否越界. 分组投切电容器的基本参数如表 2 所示,电压基准值选择 12.66 kV,电压的上下限是 0.95~1.05,节点电压的优化区间为 0.97~1.03.

3.2 结果分析

笔者分别就 3 种场景进行分析,情景 1:无储能系统,考虑电压偏差;情景 2:有储能系统,不考

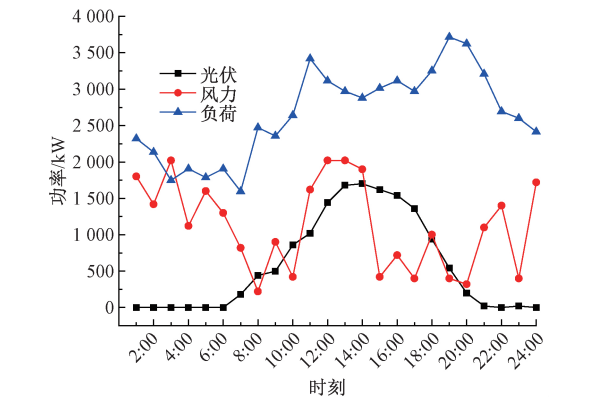


图 1 分布式电源出力 and 负荷曲线

Fig.1 Curve for load demand and DG output

表 1 DG 的安装位置和参数

Tab.1 Basic installation parameters of DGS

参数	风机		光伏		
接入节点	13	30	7	10	24 27
容量/kVA	1 000	1 000	500	500	300 300

表 2 CB 的安装位置和参数

Tab.2 Basic installation parameters of CB

接入节点	每组补偿功率/kvar	安装组数	最大投切次数
5	25	6	5
12	25	6	5

虑电压偏差;情景 3:有储能系统,考虑电压偏差. 分别在分布式电源渗透功率为 25%、50%、75%、100%时,对上面 3 种情景进行算例分析,结果如表 3 所示.

从表 3 中通过 B1 和 B3、C1 和 C3、D1 和 D3、E1 和 E3 对比可以看到,储能装置作为有功参与优化的时候能降低网损和电压偏差. 从 B2 和 B3、C2 和 C3、E2 和 E3、D2 和 D3 中可以看出,当不将电压偏差作为优化目标时,可以适当降低网损,但同时会造成较大的电压偏差,影响电压质量. 随着

表 3 不同情景下的网损及弃 DG 功率和电压偏差

Tab.3 The network loss, abandon DG and voltage deviation under different scenarios

渗透率/%	情景	网损/kW	弃风/kW	弃光/kW	电压偏差/pu
25	情景 B1	1 537.0	337.750 1	0.000 186 14	11.542 6
	情景 B2	1 436.6	337.772 9	0.031 1	1 307
	情景 B3	1 494.8	337.750 1	0.000 193 27	3.540 1
50	情景 C1	1 200.3	675.500 3	0.000 412 92	3.646 6
	情景 C2	1 089.2	675.500 3	0.000 399 03	1 492
	情景 C3	1 132.9	675.538 3	0.051 0	0.191 2
75	情景 D1	977.218 0	1 013.3	0.080 7	1.050 7
	情景 D2	839.185 9	1 013.3	0.001 5	1 913
	情景 D3	869.523 3	1 013.3	0.044 2	0.163 5
100	情景 E1	836.762 4	1 486.5	0.001 5	3.046 2
	情景 E2	683.387 0	1 403.3	0.191 8	2 570
	情景 E3	701.6	1 351.0	0.002 0	0.663 7

渗透率的不断提高,分布式电源参与优化时,能改变配电网中的潮流,达到降低网损的目标,但是对弃风和弃光影响不是很大,这是因为笔者所建的储能系统模型只能进行有功调节,不能进行无功调节.

从图 2 可以看出,在渗透率达到 100% 时,情景 E3 时的电压偏差较小,而无储能装置作为有功协调优化时,电压明显偏高,不计及电压偏差时,电压偏差较大. 在 0:00 的时候,由于负荷需求高于分布式电源的出力,导致电压相对较低,在 4:00 的时候,由于分布式电源出力增大,会抬高电压,在大概中午 11:00 的时候,由于负荷需求大,电压会下降,在 14:00 的时候,由于风电出力突然降低,会造成电压降低,在 20:00 的时候,由于负荷的持续增大,电压会降低到最低点,但是电压都没有越界,保持在较好的状态.

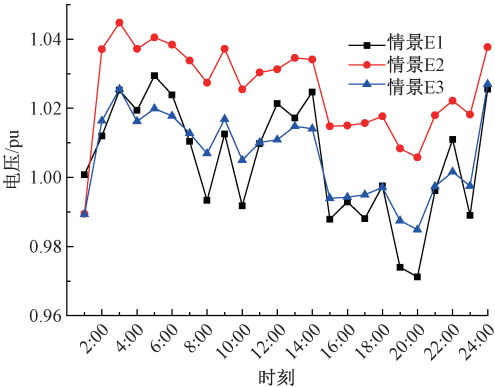


图 2 33 节点的电压

Fig. 2 Voltage value of 33 node

从图 3 中可以看出,当渗透率不断增大时,配电网中的电压也增大,但是在笔者所提出的控制策略下,电压没有越界,而是稳定在 0.96 ~ 1.03 pu 之间,充分证明所提出的控制策略的有效性.

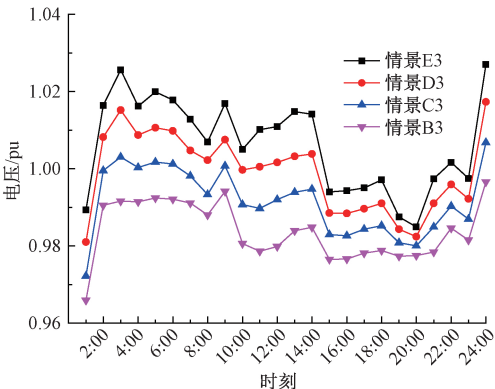


图 3 渗透率不同时 18 节点的电压

Fig. 3 The voltage of 18 nodes with different permeability

图 4 和图 5 是渗透率为 75% 时的控制策略. 图 4 是 CB 的控制策略;图 5 是 ESS 控制策略. 从图 4 可以看出,储能装置会使 CB 的投切组数减少,切换次数增多,充分证明了储能装置作为有功参与了电压的调节. 不考虑电压偏差时,CB 的切换组数之间变换也较小,说明不计及电压偏差时,没有利用好 CB 对电压偏差的调控作用. 从图 5 可以看出,不计及电压偏差量时,储能装置的变化趋势基本一样,电压偏差主要是由 CB、OLTC 装置来进行控制,储能装置对电压偏差的调控作用不明显.

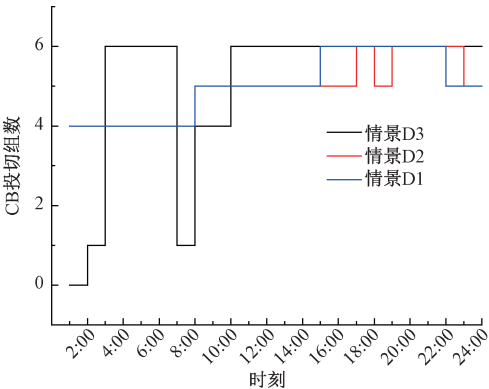


图 4 5 节点 CB 的控制策略

Fig. 4 CB control strategy of Node 5

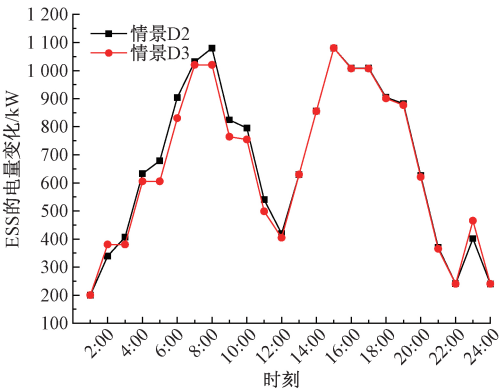


图 5 节点 33 ESS 的控制策略

Fig. 5 ESS control strategy of Node 33

4 结论

(1)随着分布式电源的渗透率不断提高,其网络损耗不断减小,而弃风量逐渐增大,在笔者提出的控制策略下,电压没有出现越界.

(2)笔者提出的储能装置的充放电策略能降低网损、电压偏差等;当不将电压偏差作为优化目标时,可以适当降低网损,但是会造成较大的电压偏差,从而影响供电质量.

参考文献:

- [1] 邢海军,程浩忠,曾平良,等. 基于二阶锥规划的间歇性分布式电源消纳研究[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6):74-80.
- [2] 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, 36(22):12-18.
- [3] 徐俊俊,黄永红,王琪,等. 基于自然选择粒子群算法的含 DG 接入的配电网无功优化[J]. 电测与仪表, 2014, 51(10):33-38.
- [4] 杨胡萍,李威仁,左士伟,等. 基于改进遗传算法的电力系统无功优化[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(6):66-69.
- [5] 李鸿鑫,李银红,陈金富,等. 自适应选择进化算法的多目标无功优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10):71-78.
- [6] 张世达,孙永辉,赵景涛,等. 基于随机响应面法的主动配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13):30-38.
- [7] 杨德昌,廖文龙,孙雪,等. 基于满意度阈值判定的主动配电网无功优化[J]. 电网技术, 2017, 41(9):3003-3010.
- [8] ZHWNG W Y, WU W C, ZHANG B M, et al. A fully distributed reactive power optimization and control method for active distribution networks[J]. IEEE transactions on smart grid, 2016, 7(2):1021-1033.
- [9] 梁俊文,林舜江,刘明波. 主动配电网分布式无功优化控制方法[J]. 电网技术, 2018, 42(1):230-237.
- [10] 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.
- [11] 刘一兵,吴文传,张伯明,等. 基于混合整数二阶锥规划的三相有源配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15):58-64.
- [12] 全然,韦化,简金宝. 求解大规模机组组合问题的二阶锥规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25):101-107.
- [13] NICK M, CHERKAoui R, CHERKAoui M. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support[J]. IEEE transactions on power systems, 2014, 29(5):2300-2310.
- [14] LI P, JI H, WANG C, et al. A coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point[J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2017, 8(4):1430-1442.
- [15] 朱永胜,王杰,瞿博阳,等. 采用基于分解的多目标进化算法的电力环境经济调度[J]. 电网技术, 2014, 38(6):1577-1584.
- [16] SAATY T L. Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP) [J]. Journal of systems science and systems engineering, 2004, 13(1):1-35.

Dynamic Reactive Power Optimization in Active Distribution Network Based on Second-Order Cone Programming

ZHANG Jian¹, XIONG Zhuangzhuang¹, WANG Mingdong¹, ZHU Yongsheng²

(1. School of Industrial Technology Research Institute, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In order to increase the utilization rate of distributed energy and the to reduce network loss and voltage deviation, the multi-objective model of dynamic reactive power optimization with active and reactive power coordination for the distribution network was proposed in this paper. It consisted of Energy Storage System, Capacitors Banks, Static VAR Compensation, On-load Tap Changer, and distribution generation. The analytic hierarchy process was used to transform the multi-objective into a single target. The Big-M method was used to linearize the model, and the relaxation theory is used to relax the convexity into the form of the second-order cone programming. Case study on the improved IEEE 33 network verified the effectiveness of the proposed model. Cplex was used to get the switching capacity and time each active management device. It was proved that the proposed method in this paper was reasonable.

Key words: active distribution network; second-order cone programming; multi-objective optimization; reactive power optimization