



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103701132 B

(45) 授权公告日 2015. 09. 30

(21) 申请号 201310711313. 3

(22) 申请日 2013. 12. 20

(73) 专利权人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区清华园 1 号

(72) 发明人 吴文传 张伯明 孙宏斌 郭庆来

刘一兵 巨云涛

(74) 专利代理机构 北京清亦华知识产权代理事

务所 (普通合伙) 11201

代理人 罗文群

(51) Int. Cl.

H02J 3/16(2006. 01)

审查员 曹志明

权利要求书2页 说明书6页

(54) 发明名称

一种基于有功 - 无功协调的控制主动配电网过电压的方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于有功 - 无功协调的控制主动配电网过电压的方法,属于电力系统运行和控制技术领域。本方法建立了分布式电源的控制目标函数,利用三相节点支路关联矩阵,推导出主动配电网运行的三相潮流方程,利用二进制编码方式处理分组投切电容器,将离散控制问题连续化处理。最后,综合控制主动配电网中的分布式电源、连续无功补偿装置、分组投切电容器的有功功率和无功功率等,以控制主动配电网的过电压。本方法既可用于辐射状配电网,也可直接用于合环后的弱环状配电网的过电压控制;本方法将二进制编码方式引入到主动配电网过电压控制,将离散问题连续化,大幅提高计算效率。

1. 一种基于有功 - 无功协调的控制主动配电网过电压的方法, 其特征在于该方法包括以下步骤:

(1) 建立主动配电网过电压控制的目标函数:

$$\min \sum_{i=1}^{i=N_{DG}} \sum_{\varphi \in \{A, B, C\}} (P_{i, DG}^{\varphi, pre} - P_{i, DG}^{\varphi})^2$$

其中,  $N_{DG}$  为主动配电网中的分布式电源数量, 脚标  $\varphi$  表示主动配电网的 A, B, C 三相,  $P_{i, DG}^{\varphi, pre}$  为主动配电网中节点  $i$  上所连接的分布式电源的各相有功功率预测值,  $P_{i, DG}^{\varphi}$  为与主动配电网节点  $i$  连接的分布式电源的三相有功功率;

(2) 对主动配电网进行拓扑搜索, 形成一个主动配电网的三相节点支路关联矩阵  $\mathbf{A}^{\varphi}$ , 以及一个关于支路自阻抗和互阻抗的支路阻抗矩阵  $\mathbf{Z}_b^{\varphi}$ , 并根据三相节点支路关联矩阵  $\mathbf{A}^{\varphi}$  和支路阻抗矩阵  $\mathbf{Z}_b^{\varphi}$ , 形成一个主动配电网的三相节点导纳矩阵  $\mathbf{Y}^{\varphi} = \mathbf{A}^{\varphi} \times (\mathbf{Z}_b^{\varphi})^{-1} \times (\mathbf{A}^{\varphi})^T$ ;

(3) 根据上述主动配电网的三相节点导纳矩阵  $\mathbf{Y}^{\varphi} = \mathbf{A}^{\varphi} \times (\mathbf{Z}_b^{\varphi})^{-1} \times (\mathbf{A}^{\varphi})^T$ , 利用电力系统能量平衡方程, 得到主动配电网的潮流方程约束为:

$$\mathbf{P}^{\varphi} = \text{real}(\mathbf{V}^{\varphi} \times (\mathbf{A}^{\varphi} \times (\mathbf{Z}_b^{\varphi})^{-1} \times (\mathbf{A}^{\varphi})^T \times \mathbf{V}^{\varphi})^*)$$

$$\mathbf{Q}^{\varphi} = \text{imag}(\mathbf{V}^{\varphi} \times (\mathbf{A}^{\varphi} \times (\mathbf{Z}_b^{\varphi})^{-1} \times (\mathbf{A}^{\varphi})^T \times \mathbf{V}^{\varphi})^*)$$

其中,  $\mathbf{V}^{\varphi}$  为主动配电网三相节点电压列矢量,  $\mathbf{A}^{\varphi}$  为主动配电网的三相节点 - 支路关联矩阵,  $\mathbf{Z}_b^{\varphi}$  为主动配电网三相支路阻抗矩阵, real、imag、\* 分别为取对应元素的实部、虚部、共轭,  $\mathbf{P}^{\varphi}$  和  $\mathbf{Q}^{\varphi}$  是分别由主动配电网三相节点  $i$  净注入有功功率和无功功率  $P_i^{\varphi}$  和  $Q_i^{\varphi}$  构成的列矢量;

(4) 根据上述列矢量  $\mathbf{P}^{\varphi}$  和  $\mathbf{Q}^{\varphi}$ , 得到主动配电网中节点  $i$  的净注入有功功率和无功功率的约束分别为:

$$P_i^{\varphi} = P_{i, DG}^{\varphi} - P_{i, d}^{\varphi}$$

$$Q_i^{\varphi} = Q_{i, DG}^{\varphi} + Q_{i, com}^{\varphi} - Q_{i, d}^{\varphi}$$

其中,  $P_{i, DG}^{\varphi}$  和  $Q_{i, DG}^{\varphi}$  分别为与主动配电网节点  $i$  连接的分布式电源的三相有功功率和无功功率,  $P_{i, d}^{\varphi}$  和  $Q_{i, d}^{\varphi}$  为与主动配电网节点  $i$  连接的负荷的三相有功功率和无功功率,  $Q_{i, com}^{\varphi}$  为与主动配电网节点  $i$  连接的无功补偿装置的三相无功功率;

(5) 主动配电网的安全电压约束为:  $V_i^{\varphi, \min} \leq V_i^{\varphi} \leq V_i^{\varphi, \max}$ ,

其中,  $V_i^{\varphi}$  为主动配电网节点  $i$  的各相电压幅值,  $V_i^{\varphi, \min}$  和  $V_i^{\varphi, \max}$  分别是主动配电网节点  $i$  的各相电压幅值的上限值和下限值;

(6) 主动配电网的配电变压器根节点的有功功率和无功功率约束分别为:

$$P_0^{\varphi, \min} \leq P_0^{\varphi} \leq P_0^{\varphi, \max}$$

$$Q_0^{\varphi, \min} \leq Q_0^{\varphi} \leq Q_0^{\varphi, \max}$$

其中,  $P_0^\varphi$  为从配电变压器根节点流入主动配电网的各相有功功率,  $P_0^{\varphi,\min}$ ,  $P_0^{\varphi,\max}$  分别为主动配电网的调控中心设定的配电变压器根节点各相有功功率上限值和下限值,  $Q_0^\varphi$  为从配电变压器根节点流入主动配电网的各相无功功率,  $Q_0^{\varphi,\min}$ ,  $Q_0^{\varphi,\max}$  分别为主动配电网的调控中心设定的配电变压器根节点各相无功功率上限值和下限值;

(7) 主动配电网的分组投切电容器的运行约束, 利用二进制编码方式表示为:

$$\begin{aligned} Q_{i,\text{com}}^\varphi &= t_i^\varphi Q_{i,\text{com}}^{\varphi,\text{step}} + Q_{i,\text{com}}^{\varphi,0} \\ t_i^\varphi &= \alpha_i^{\varphi,0} 2^0 + \alpha_i^{\varphi,1} 2^1 \\ \alpha_i^{\varphi,j} (\alpha_i^{\varphi,j} - 1) &= 0 \quad , \\ 0 &\leq \alpha_i^{\varphi,j} \leq 1 \end{aligned}$$

其中,  $Q_{i,\text{com}}^\varphi$  为主动配电网中与第  $i$  个节点连接的第  $i$  个分组投切电容器组的三相无功功率,  $Q_{i,\text{com}}^{\varphi,\text{step}}$  为第  $i$  个分组投切电容器组的各相中每组电容器的无功功率,  $Q_{i,\text{com}}^{\varphi,0}$  为第  $i$  个分组投切电容器组的当前运行无功功率,  $\alpha_i^{\varphi,j}$  和  $t_i^\varphi$  分别为变量,  $\alpha_i^{\varphi,j}$  取值范围为 0 与 1 之间的实数,  $t_i^\varphi \in \text{int}\{0,1,2,3\}$ ;

(8) 主动配电网中的连续无功补偿装置的运行约束为:

$$Q_{i,\text{com}}^{\varphi,\min} \leq Q_{i,\text{com}}^\varphi \leq Q_{i,\text{com}}^{\varphi,\max}$$

其中,  $Q_{i,\text{com}}^\varphi$  为主动配电网中与第  $i$  个节点连接的连续无功补偿装置的三相无功功率,  $Q_{i,\text{com}}^{\varphi,\min}$  和  $Q_{i,\text{com}}^{\varphi,\max}$  为主动配电网中与第  $i$  个节点连接的连续无功补偿装置的无功功率的下限值和上限值;

(9) 主动配电网中分布式电源的运行约束为:

$$\begin{aligned} 0 &\leq P_{i,\text{DG}}^\varphi \leq P_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}} \\ 0 &\leq Q_{i,\text{DG}}^\varphi \leq Q_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}} \\ Q_{i,\text{DG}}^\varphi &= P_{i,\text{DG}}^\varphi \tan \theta \end{aligned}$$

其中,  $P_{i,\text{DG}}^\varphi$  为与主动配电网节点  $i$  连接的分布式电源的三相有功功率, 其取值范围为 0 到  $P_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}}$ ,  $P_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}}$  为主动配电网中节点  $i$  连接的分布式电源的有功功率预测值,  $Q_{i,\text{DG}}^\varphi$  为与主动配电网节点  $i$  连接的分布式电源的三相无功功率, 其取值范围为 0 到  $Q_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}}$ ,  $Q_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}}$  为主动配电网中节点  $i$  连接的分布式电源的各相无功功率预测值,  $\theta$  为主动配电网中分布式电源的功率因数角;

(10) 采用原始-对偶内点算法, 根据上述步骤 (3) 的潮流方程和步骤 (4) ~ 步骤 (9) 的主动配电网的运行约束, 对上述主动配电网中分布式电源的控制目标函数求解, 得到主动配电网中分布式电源、连续无功补偿装置和分组投切电容器组的各相有功功率值、无功功率值, 并发送到主动配电网调度中心, 实现主动配电网过电压的控制。

## 一种基于有功 - 无功协调的控制主动配电网过电压的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于有功 - 无功协调的控制主动配电网过电压的方法,属于电力系统运行和控制技术领域。

### 背景技术

[0002] 发展分布式发电(Distributed Generation, DG),可以优化能源结构、推动节能减排和实现经济可持续发展。近年来,配电网中分布式电源的渗透率迅速增长,传统配电网将逐步演变为具有众多可调可控资源的主动配电网(Active Distribution Network, ADN),其运行管理也将遇到众多挑战。

[0003] 在主动配电网中,架空线路一般不进行三相整体循环换位,且主动配电网中负荷不平衡现象普遍存在,基于单相模型的分析决策往往会引入较大误差,导致错误的调度策略,影响配电网的安全和经济运行。

[0004] 另外,主动配电网中的线路电阻与电抗接近,有功功率和无功功率紧密耦合,主动配电网中节点注入的有功功率和无功功率波动均能影响节点电压,单纯的无功功率控制对电压的改变幅度有限。如果不合理地管理主动配电网中现有设备,将会造成浪费可再生能源、电压质量降低、配电变压器根节点功率剧烈波动等严重问题,因此有功功率和无功功率协调的控制配电网过电压是一个重要课题。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是提出一种基于有功 - 无功协调的控制主动配电网过电压的方法,本方法利用三相潮流方程,考虑主动配电网的运行约束,以控制主动配电网的过电压,提高分布式电源利用率。

[0006] 本发明提出的基于有功 - 无功协调的控制主动配电网过电压的方法,包括以下步骤:

[0007] (1) 建立主动配电网过电压控制的目标函数:

[0008]

$$\min \sum_{i=1}^{i=N_{DG}} \sum_{\varphi \in \{A, B, C\}} (P_{i, DG}^{\text{pre}, \varphi} - P_{i, DG}^{\varphi})^2$$

[0009] 其中,  $N_{DG}$  为主动配电网中的分布式电源数量,  $\varphi$  表示主动配电网的 A, B, C 三相,  $P_{i, DG}^{\text{pre}, \varphi}$  为主动配电网中节点  $i$  上所连接的分布式电源的各相有功功率预测值,  $P_{i, DG}^{\varphi}$  为主动配电网中第  $i$  个分布式电源的各相有功功率控制目标值;

[0010] (2) 对主动配电网进行拓扑搜索,形成一个主动配电网的三相节点支路关联矩阵  $\mathbf{A}^{\varphi}$ , 以及一个关于支路自阻抗和互阻抗的支路阻抗矩阵  $\mathbf{Z}_b^{\varphi}$ , 并根据三相节点支路关联矩阵  $\mathbf{A}^{\varphi}$  和支路阻抗矩阵  $\mathbf{Z}_b^{\varphi}$ , 形成一个主动配电网的三相节点导纳矩阵

$$\mathbf{Y}^\varphi = \mathbf{A}^\varphi \times (\mathbf{Z}_b^\varphi)^{-1} \times (\mathbf{A}^\varphi)^T;$$

[0011] (3)根据上述主动配电网的三相节点导纳矩阵  $\mathbf{Y}^\varphi = \mathbf{A}^\varphi \times (\mathbf{Z}_b^\varphi)^{-1} \times (\mathbf{A}^\varphi)^T$ ，利用电力系统能量平衡方程，得到主动配电网的潮流方程约束为：

[0012]

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^\varphi &= \text{real}(\mathbf{V}^\varphi \times (\mathbf{A}^\varphi \times (\mathbf{Z}_b^\varphi)^{-1} \times (\mathbf{A}^\varphi)^T \times \mathbf{V}^\varphi)^*) \\ \mathbf{Q}^\varphi &= \text{imag}(\mathbf{V}^\varphi \times (\mathbf{A}^\varphi \times (\mathbf{Z}_b^\varphi)^{-1} \times (\mathbf{A}^\varphi)^T \times \mathbf{V}^\varphi)^*) \end{aligned}$$

[0013] 其中， $\mathbf{V}^\varphi$  为主动配电网三相节点电压列矢量， $\mathbf{A}^\varphi$  为主动配电网的三相节点-支路关联矩阵， $\mathbf{Z}_b^\varphi$  为主动配电网三相支路阻抗矩阵，real、imag、\* 分别为取对应元素的实部、虚部、共轭， $\mathbf{P}^\varphi$  和  $\mathbf{Q}^\varphi$  是分别由主动配电网三相节点净注入有功功率和无功功率  $P_i^\varphi$  和  $Q_i^\varphi$  构成的列矢量；

[0014] (4)根据上述列矢量  $\mathbf{P}^\varphi$  和  $\mathbf{Q}^\varphi$ ，得到主动配电网中节点 i 的净注入有功功率和无功功率的约束分别为：

[0015]

$$\begin{aligned} P_i^\varphi &= P_{i,\text{DG}}^\varphi - P_{i,\text{d}}^\varphi \\ Q_i^\varphi &= Q_{i,\text{DG}}^\varphi + Q_{i,\text{com}}^\varphi - Q_{i,\text{d}}^\varphi \end{aligned}$$

[0016] 其中， $P_{i,\text{DG}}^\varphi$  和  $Q_{i,\text{DG}}^\varphi$  分别为与主动配电网节点 i 连接的分布式电源的三相有功功率和无功功率， $P_{i,\text{d}}^\varphi$  和  $Q_{i,\text{d}}^\varphi$  为与主动配电网节点 i 连接的负荷的三相有功功率和无功功率， $Q_{i,\text{com}}^\varphi$  为与主动配电网节点 i 连接的无功补偿装置的三相无功功率；

[0017] (5)主动配电网的安全电压约束为： $V_i^{\varphi,\min} \leq V_i^\varphi \leq V_i^{\varphi,\max}$ ，

[0018] 其中， $V_i^\varphi$  为主动配电网节点 i 的各相电压幅值， $V_i^{\varphi,\min}$  和  $V_i^{\varphi,\max}$  分别是主动配电网电压幅值的上限值和下限值；

[0019] (6)主动配电网的配电变压器根节点的有功功率和无功功率约束分别为：

[0020]

$$\begin{aligned} P_0^{\varphi,\min} &\leq P_0^\varphi \leq P_0^{\varphi,\max} \\ Q_0^{\varphi,\min} &\leq Q_0^\varphi \leq Q_0^{\varphi,\max} \end{aligned}$$

[0021] 其中， $P_0^\varphi$  为从配电变压器根节点流入主动配电网的各相有功功率， $P_0^{\varphi,\min}$ ， $P_0^{\varphi,\max}$  分别为主动配电网的调控中心设定的配电变压器根节点各相有功功率上限值和下限值， $Q_0^\varphi$  为从配电变压器根节点流入主动配电网的各相无功功率， $Q_0^{\varphi,\min}$ ， $Q_0^{\varphi,\max}$  分别为主动配电网的调控中心设定的配电变压器根节点各相无功功率上限值和下限值；

[0022] (7)主动配电网的分组投切电容器的运行约束，利用二进制编码方式表示为：

[0023]

$$\begin{aligned}
Q_{i,\text{com}}^\varphi &= t_i^\varphi Q_{i,\text{com}}^{\varphi,\text{step}} + Q_{i,\text{com}}^{\varphi,0} \\
t_i^\varphi &= \alpha_i^{\varphi,0} 2^0 + \alpha_i^{\varphi,1} 2^1 \\
\alpha_i^{\varphi,j} (\alpha_i^{\varphi,j} - 1) &= 0 \\
0 &\leq \alpha_i^{\varphi,j} \leq 1
\end{aligned}$$

[0024] 其中,  $Q_{i,\text{com}}^\varphi$  为第  $i$  个分组投切电容器组的各相投运无功功率,  $Q_{i,\text{com}}^{\varphi,\text{step}}$  为第  $i$  个分组投切电容器组的各相中每组电容器的无功功率,  $Q_{i,\text{com}}^{\varphi,0}$  为第  $i$  个分组投切电容器组的当前运行无功功率,  $\alpha_i^{\varphi,j}$  和  $t_i^\varphi$  分别为变量,  $\alpha_i^{\varphi,j}$  取值范围为 0 与 1 之间的实数,  $t_i^\varphi \in \text{int}\{0,1,2,3\}$ ;

[0025] (8) 主动配电网中的连续无功补偿装置的运行约束为:

[0026]

$$Q_{i,\text{com}}^{\varphi,\text{min}} \leq Q_{i,\text{com}}^\varphi \leq Q_{i,\text{com}}^{\varphi,\text{max}}$$

[0027] 其中,  $Q_{i,\text{com}}^\varphi$  为主动配电网中连续无功补偿装置的无功功率控制值,  $Q_{i,\text{com}}^{\varphi,\text{min}}$  和  $Q_{i,\text{com}}^{\varphi,\text{max}}$  为主动配电网中连续无功补偿装置的无功功率的下限值和上限值;

[0028] (9) 主动配电网中分布式电源的运行约束为:

[0029]

$$\begin{aligned}
0 &\leq P_{i,\text{DG}}^\varphi \leq P_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}} \\
0 &\leq Q_{i,\text{DG}}^\varphi \leq Q_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}} \\
Q_{i,\text{DG}}^\varphi &= P_{i,\text{DG}}^\varphi \tan \varphi
\end{aligned}$$

[0030] 其中,  $P_{i,\text{DG}}^\varphi$  为主动配电网中分布式电源的有功功率控制量, 其取值范围为 0 到  $P_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}}$ ,  $P_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}}$  为主动配电网中分布式电源的有功功率预测值,  $Q_{i,\text{DG}}^\varphi$  为主动配电网中分布式电源的无功功率控制量, 其取值范围为 0 到  $Q_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}}$ ,  $Q_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}}$  为主动配电网中分布式电源的无功功率预测值,  $\varphi$  为主动配电网中分布式电源的功率因数角;

[0031] (10) 采用原始-对偶内点算法, 根据上述步骤(3)的潮流方程和步骤(4)~步骤(9)的主动配电网的运行约束, 对上述主动配电网中分布式电源的控制目标函数求解, 得到主动配电网中分布式电源、连续无功补偿装置和分组投切电容器组的各相有功功率值、无功功率值, 并发送到主动配电网调度中心, 实现主动配电网过电压的控制。

[0032] 本发明提出的基于有功-无功协调的控制主动配电网过电压的方法, 其优点是:

[0033] 1、本发明方法利用三相节点支路关联矩阵, 建立了主动配电网的三相潮流方程, 本发明既可用于辐射状配电网和也可直接用于合环后的弱环状配电网的过电压控制。

[0034] 2、本发明方法将二进制编码方式引入到主动配电网过电压控制, 将离散问题连续化, 大幅提高计算效率。

[0035] 3、本发明方法限定配电变压器根节点的功率波动, 避免主动配电网中负荷功率和分布式电源功率剧烈波动对配电变压器造成损害。

[0036] 4、本方法提出了有功-无功协调的控制主动配电网过电压的方法, 可以消除有功功率和无功功率解耦的主动配电网控制策略中的误差, 提高可再生能源利用率, 控制主动

配电网的过电压。

### 具体实施方式

[0037] 本发明提出的基于有功-无功协调的控制主动配电网过电压的方法,包括以下步骤:

[0038] (1) 建立主动配电网过电压控制的目标函数:

[0039]

$$\min \sum_{i=1}^{i=N_{DG}} \sum_{\varphi \in \{A,B,C\}} (P_{i,DG}^{pre,\varphi} - P_{i,DG}^{\varphi})^2$$

[0040] 含分布式电源的主动配电网不仅要保证电网的经济运行,更重要的是控制主动配电网的过电压,提高分布式电源利用率,为此将目标函数定义。其中, $N_{DG}$ 为主动配电网中的分布式电源数量, $\varphi$ 表示主动配电网的 A, B, C 三相, $P_{i,DG}^{pre,\varphi}$ 为主动配电网中节点 i 上所连接的分布式电源的各相有功功率预测值, $P_{i,DG}^{\varphi}$ 为主动配电网中第 i 个分布式电源的各相有功功率控制目标值;从耗量微增率角度可以看出,本发明所采用的二次型目标函数可以使得预测出力大的分布式电源优先尽可能满发,提高分布式电源利用率。

[0041] (2) 对主动配电网进行拓扑搜索,形成一个主动配电网的三相节点支路关联矩阵  $\mathbf{A}^{\varphi}$ , 以及一个关于支路自阻抗和互阻抗的支路阻抗矩阵  $\mathbf{Z}_b^{\varphi}$ , 并根据三相节点支路关联矩阵  $\mathbf{A}^{\varphi}$  和支路阻抗矩阵  $\mathbf{Z}_b^{\varphi}$ , 形成一个主动配电网的三相节点导纳矩阵  $\mathbf{Y}^{\varphi} = \mathbf{A}^{\varphi} \times (\mathbf{Z}_b^{\varphi})^{-1} \times (\mathbf{A}^{\varphi})^T$ ;

[0042] (3) 根据上述主动配电网的三相节点导纳矩阵  $\mathbf{Y}^{\varphi} = \mathbf{A}^{\varphi} \times (\mathbf{Z}_b^{\varphi})^{-1} \times (\mathbf{A}^{\varphi})^T$ , 利用电力系统能量平衡方程,得到主动配电网的潮流方程约束为:

[0043]

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^{\varphi} &= \text{real}(\mathbf{V}^{\varphi} \times (\mathbf{A}^{\varphi} \times (\mathbf{Z}_b^{\varphi})^{-1} \times (\mathbf{A}^{\varphi})^T \times \mathbf{V}^{\varphi})^*) \\ \mathbf{Q}^{\varphi} &= \text{imag}(\mathbf{V}^{\varphi} \times (\mathbf{A}^{\varphi} \times (\mathbf{Z}_b^{\varphi})^{-1} \times (\mathbf{A}^{\varphi})^T \times \mathbf{V}^{\varphi})^*) \end{aligned}$$

[0044] 为方便地描述三相模型,本发明功率平衡约束采用了矩阵形式。其中, $\mathbf{V}^{\varphi}$ 为主动配电网三相节点电压列矢量, $\mathbf{A}^{\varphi}$ 为主动配电网的三相节点-支路关联矩阵, $\mathbf{Z}_b^{\varphi}$ 为主动配电网三相支路阻抗矩阵,real、imag、\* 分别为取对应元素的实部、虚部、共轭, $\mathbf{P}^{\varphi}$ 和 $\mathbf{Q}^{\varphi}$ 是分别由主动配电网三相节点净注入有功功率和无功功率  $P_i^{\varphi}$ 和 $Q_i^{\varphi}$ 构成的列矢量;

[0045] (4) 根据上述列矢量  $\mathbf{P}^{\varphi}$ 和 $\mathbf{Q}^{\varphi}$ ,得到主动配电网中节点 i 的净注入有功功率和无功功率的约束分别为:

[0046]

$$\begin{aligned} P_i^{\varphi} &= P_{i,DG}^{\varphi} - P_{i,d}^{\varphi} \\ Q_i^{\varphi} &= Q_{i,DG}^{\varphi} + Q_{i,com}^{\varphi} - Q_{i,d}^{\varphi} \end{aligned}$$

[0047] 其中, $P_{i,DG}^{\varphi}$ 和 $Q_{i,DG}^{\varphi}$ 分别为与主动配电网节点 i 连接的分布式电源的三相有功功率

和无功功率,  $P_{i,d}^\varphi$  和  $Q_{i,d}^\varphi$  为与主动配电网节点  $i$  连接的负荷的三相有功功率和无功功率,  $Q_{i,com}^\varphi$  为与主动配电网节点  $i$  连接的无功补偿装置的三相无功功率, 无功补偿装置可以是分组投切电容器、连续无功补偿装置等;

[0048] (5) 主动配电网的安全电压约束为:  $V_i^{\varphi,\min} \leq V_i^\varphi \leq V_i^{\varphi,\max}$ ,

[0049] 其中,  $V_i^\varphi$  为主动配电网节点  $i$  的各相电压幅值,  $V_i^{\varphi,\min}$  和  $V_i^{\varphi,\max}$  分别是主动配电网电压幅值的上限值和下限值;

[0050] (6) 为了抑制主动配电网的功率波动对输电网的影响, 需要将配电网根节点的关口交换功率约束考虑在内, 主动配电网的配电变压器根节点的有功功率和无功功率约束分别为:

[0051]

$$\begin{aligned} P_0^{\varphi,\min} &\leq P_0^\varphi \leq P_0^{\varphi,\max} \\ Q_0^{\varphi,\min} &\leq Q_0^\varphi \leq Q_0^{\varphi,\max} \end{aligned}$$

[0052] 其中,  $P_0^\varphi$  为从配电变压器根节点流入主动配电网的各相有功功率,  $P_0^{\varphi,\min}$ ,  $P_0^{\varphi,\max}$  分别为主动配电网的调控中心设定的配电变压器根节点各相有功功率上限值和下限值,  $Q_0^\varphi$  为从配电变压器根节点流入主动配电网的各相无功功率,  $Q_0^{\varphi,\min}$ ,  $Q_0^{\varphi,\max}$  分别为主动配电网的调控中心设定的配电变压器根节点各相无功功率上限值和下限值;

[0053] (7) 主动配电网的分组投切电容器的运行约束, 利用二进制编码方式表示为:

[0054] 分组电容器是配电网重要的无功补偿设备, 其投切状态本质上是离散决策变量, 本文采用二进制编码和补充约束的形式将离散变量连续化。

[0055]

$$\begin{aligned} Q_{i,com}^\varphi &= t_i^\varphi Q_{i,com}^{\varphi,step} + Q_{i,com}^{\varphi,0} \\ t_i^\varphi &= \alpha_i^{\varphi,0} 2^0 + \alpha_i^{\varphi,1} 2^1 \\ \alpha_i^{\varphi,j} (\alpha_i^{\varphi,j} - 1) &= 0 \\ 0 &\leq \alpha_i^{\varphi,j} \leq 1 \end{aligned}$$

[0056] 其中,  $Q_{i,com}^\varphi$  为第  $i$  个分组投切电容器组的各相投运无功功率,  $Q_{i,com}^{\varphi,step}$  为第  $i$  个分组投切电容器组的各相中每组电容器的无功功率,  $Q_{i,com}^{\varphi,0}$  为第  $i$  个分组投切电容器组的当前运行无功功率,  $\alpha_i^{\varphi,j}$  和  $t_i^\varphi$  分别为变量,  $\alpha_i^{\varphi,j}$  取值范围为 0 与 1 之间的实数, 通过约束  $0 \leq \alpha_i^{\varphi,j} \leq 1$  将其控制为 01 变量, 进而将  $t_i^\varphi$  控制为整数, 本文选择电容器档位为 4 档, 即  $t_i^\varphi \in \text{int}\{0, 1, 2, 3\}$ , 如需扩展档位数量只需增加 2 进制编码数即可。

[0057] (8) 主动配电网中的连续无功补偿装置的运行约束为:

[0058]

$$Q_{i,com}^{\varphi,\min} \leq Q_{i,com}^\varphi \leq Q_{i,com}^{\varphi,\max}$$



[0059] 其中,  $Q_{i,\text{com}}^\varphi$  为主动配电网中连续无功补偿装置的无功功率控制值,  $Q_{i,\text{com}}^{\varphi,\text{min}}$  和  $Q_{i,\text{com}}^{\varphi,\text{max}}$  为主动配电网中连续无功补偿装置的无功功率的下限值和上限值;

[0060] (9) 主动配电网中分布式电源的运行约束为:

[0061]

$$\begin{aligned} 0 &\leq P_{i,\text{DG}}^\varphi \leq P_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}} \\ 0 &\leq Q_{i,\text{DG}}^\varphi \leq Q_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}} \\ Q_{i,\text{DG}}^\varphi &= P_{i,\text{DG}}^\varphi \tan \varphi \end{aligned}$$

[0062] 其中,  $P_{i,\text{DG}}^\varphi$  为主动配电网中分布式电源的有功功率控制量, 其取值范围为 0 到  $P_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}}$ ,  $P_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}}$  为主动配电网中分布式电源的有功功率预测值,  $Q_{i,\text{DG}}^\varphi$  为主动配电网中分布式电源的无功功率控制量, 其取值范围为 0 到  $Q_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}}$ ,  $Q_{i,\text{DG}}^{\varphi,\text{pre}}$  为主动配电网中分布式电源的无功功率预测值,  $\varphi$  为主动配电网中分布式电源的功率因数角; 根据典型文献, 本方法分布式电源稳态运行时采用 PQ 类型。根据已有研究, 分布式电源通过电力电子装置或常规旋转电机接口并网且其并网功率已能实现有功无功分别独立调节, 为不失一般性, 本文选择定功率因数的分布式电源功率控制策略。

[0063] (10) 采用原始-对偶内点算法, 根据上述步骤(3)的潮流方程和步骤(4)~步骤(9)的主动配电网的运行约束, 对上述主动配电网中分布式电源的控制目标函数求解, 得到主动配电网中分布式电源、连续无功补偿装置和分组投切电容器组的各相有功功率值、无功功率值, 并发送到主动配电网调度中心, 实现主动配电网过电压的控制。本发明方法中采用的原始-对偶内点算法, 综合利用壁垒罚函数、拉格朗日乘子和牛顿法, 可以有效处理非凸非线性规划问题。