



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103515964 A

(43) 申请公布日 2014. 01. 15

(21) 申请号 201210225597. 0

(22) 申请日 2012. 06. 29

(71) 申请人 株式会社日立制作所

地址 日本东京都

申请人 清华大学

(72) 发明人 张靖 白日欣 于跃 吴文传

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任

公司 11021

代理人 汪惠民

(51) Int. Cl.

H02J 3/18(2006. 01)

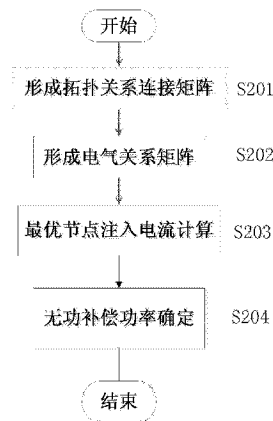
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54) 发明名称

无功补偿控制方法和无功补偿控制装置

(57) 摘要

本发明提供一种无功补偿控制方法,包括:获取表示配电网的各节点、各支路的拓扑关系的拓扑结构;根据所述拓扑结构,建立支路电流与节点注入电流之间的电学关系,并且进一步根据各支路上的阻抗,确定配电网的系统有功损耗;按照使配电网的系统有功损耗小于规定值的方式,计算出安装有各个所述无功补偿设备的各节点处的最优节点注入电流;根据所述最优节点注入电流,确定出各个所述无功补偿设备的最优无功补偿功率,并控制该无功补偿设备以该最优无功补偿功率对所述配电网进行无功补偿。



1. 一种无功补偿控制方法,用于控制安装于配电网的各节点上的各个无功补偿设备进行无功补偿,包括:

根据配电网的配置结构,获取表示配电网的各节点、各支路的拓扑关系的拓扑结构;

根据所述拓扑结构,建立所述各支路的支路电流与所述各节点处的节点注入电流之间的电学关系,并且进一步根据各支路上的阻抗,建立所述配电网的系统有功损耗与所述各节点处的节点注入电流之间的电学关系;

按照使配电网的系统有功损耗小于规定值的方式,计算出安装有各个所述无功补偿设备的各节点处的最优节点注入电流;

根据所述最优节点注入电流,确定出各个所述无功补偿设备的最优无功补偿功率,并控制该无功补偿设备以该最优无功补偿功率对所述配电网进行无功补偿。

2. 根据权利要求1所述的无功补偿控制方法,其特征在于,

在获取所述拓扑结构的步骤中,根据配电网的各节点、各支路的连接关系,形成表示拓扑结构的道路矩阵和回路矩阵,

所述道路矩阵定义节点和支路的关联关系,

所述回路矩阵定义支路和独立回路的关联关系。

3. 根据权利要求2所述的无功补偿控制方法,其特征在于,

在建立所述电学关系的步骤中,根据所述道路矩阵和所述回路矩阵,建立所述各支路的支路电流与所述各节点处的节点注入电流之间的电学关系。

4. 根据权利要求1所述的无功补偿控制方法,其特征在于,

在所确定的最优无功补偿功率超过了无功补偿设备的最大补偿功率的情况下,将该无功补偿设备的最大补偿功率作为最优无功补偿功率;

在所确定的最优无功补偿功率小于无功补偿设备的最小补偿功率的情况下,将该无功补偿设备的最小补偿功率作为最优无功补偿功率。

5. 根据权利要求4所述的无功补偿控制方法,其特征在于,

将安装有最优无功补偿功率达到最大补偿功率或最小补偿功率的无功补偿设备的节点除外,来重新进行最优节点注入电流的计算。

6. 根据权利要求1所述的无功补偿控制方法,其特征在于,

所述配电网是含分布式发电的配电网,

所述无功补偿设备是无功补偿电容或分布式发电设备。

7. 根据权利要求1所述的无功补偿控制方法,其特征在于,

所述无功补偿设备是连续型无功补偿设备或离散型无功补偿设备,

对于离散型无功补偿设备,使该无功补偿设备以最接近所述最优无功补偿功率的方式进行无功补偿。

8. 一种无功补偿控制装置,用于控制安装于配电网的各节点上的各个无功补偿设备进行无功补偿,包括:

根据配电网的配置结构,获取表示配电网的各节点、各支路的拓扑关系的拓扑结构的单元;

根据所述拓扑结构,建立所述各支路的支路电流与所述各节点处的节点注入电流之间的电学关系,并且进一步根据各支路上的阻抗,建立所述配电网的系统有功损耗与所述各

节点处的节点注入电流之间的电学关系的单元；

按照使配电网的系统有功损耗小于规定值的方式，计算出安装有各个所述无功补偿设备的各节点处的最优节点注入电流的单元；

根据所述最优节点注入电流，确定出各个所述无功补偿设备的最优无功补偿功率，并控制该无功补偿设备以该最优无功补偿功率对所述配电网进行无功补偿的单元。

## 无功补偿控制方法和无功补偿控制装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种无功补偿控制方法和无功补偿控制装置,能够在含分布式发电的配电网实时执行无功优化算法,以降低网损和 / 或均衡负载。

### 背景技术

[0002] 电能在线路传输的过程中会产生功率损耗,特别是在线路上传输大量的无功时,会产生大量损耗。所以,经常在配电网中配置无功补偿设备。电网中的无功补偿设备主要有静止无功补偿器、静止无功发生器和并联电容器。随着可再生能源发电设备不断渗透到配电网,配电网由原来被动受电的电网,转换成含分布式发电设备的有源电网。分布式发电设备具有无功补偿能力,所以分布式发电设备也是配电网中的无功补偿设备。

[0003] 配电网优化问题主要包括:无功补偿实时优化、无功补偿动态优化、无功补偿设备规划优化。这几种问题是混合整数优化问题,在数学上属 NP 难题,目前还没有数学上严格最优的多项式算法。以往提出的算法可以归纳为以下几类:

[0004] (1) 启发式规则结合现代优化算法,如:Tabu 搜索法、模拟退火法、遗传算法和蚁群算法等;

[0005] (2) 神经网络、专家系统;

[0006] (3) 近似算法,如线性规划、二次规划法等。

[0007] 大量的以往工作集中在第一类算法,主要致力于如何求取启发式规则和提高现代优化算法的效率。以蚁群算法为例,蚁群算法输入为一组优化可行解,初始种群越多,结果越好,但对应计算效率就越低,蚁群算法计算过程中,需要沿不同寻优方向进行大量的计算。

[0008] 已有算法主要有如下缺陷:

[0009] (1) 蚁群算法等现代优化算法,由于利用在不同寻优方向的大规模的试探性计算来找到最优解,算法具有类似全枚举的性质,计算效率低,无法满足在线无功补偿优化的需求;

[0010] (2) 现代优化算法、神经网络、专家系统等方法缺乏明晰的物理意义,并且存在同一求解条件下,每次计算结果不同的问题;

[0011] (3) 近似算法存在求解振荡的问题;

### 发明内容

[0012] 为了解决上述现有技术的缺陷提出了本发明。因此,本发明的目的是提出一种无功补偿控制方法和无功补偿控制装置,能够在含分布式发电的配电网实时执行无功优化算法,以降低网损和 / 或均衡负载。

[0013] 为了实现上述目的,根据本发明,提出了一种无功补偿控制方法,用于控制安装于配电网的各节点上的各个无功补偿设备进行无功补偿,包括:根据配电网的配置结构,获取表示配电网的各节点、各支路的拓扑关系的拓扑结构;根据所述拓扑结构,建立所述各支路

的支路电流与所述各节点处的节点注入电流之间的电学关系,并且进一步根据各支路上的阻抗,建立所述配电网的系统有功损耗与所述各节点处的节点注入电流之间的电学关系;按照使配电网的系统有功损耗小于规定值的方式,计算出安装有各个所述无功补偿设备的各节点处的最优节点注入电流;根据所述最优节点注入电流,确定出各个所述无功补偿设备的最优无功补偿功率,并控制该无功补偿设备以该最优无功补偿功率对所述配电网进行无功补偿。

[0014] 本发明的另一个方面,提出了一种无功补偿控制装置,用于控制安装于配电网的各节点上的各个无功补偿设备进行无功补偿,包括:根据配电网的配置结构,获取表示配电网的各节点、各支路的拓扑关系的拓扑结构的单元;根据所述拓扑结构,建立所述各支路的支路电流与所述各节点处的节点注入电流之间的电学关系,并且进一步根据各支路上的阻抗,建立所述配电网的系统有功损耗与所述各节点处的节点注入电流之间的电学关系的单元;按照使配电网的系统有功损耗小于规定值的方式,计算出安装有各个所述无功补偿设备的各节点处的最优节点注入电流的单元;根据所述最优节点注入电流,确定出各个所述无功补偿设备的最优无功补偿功率,并控制该无功补偿设备以该最优无功补偿功率对所述配电网进行无功补偿的单元。

[0015] 本发明的无功补偿优化的计算方法,将最优无功控制变量的计算转换为效率更高的最优注入电流计算。其中包括的四个主要模块,形成拓扑连接关系矩阵,形成电网电气关系矩阵,最优节点注入电流计算,无功补偿功率确定模块;首先确定拓扑连接关系矩阵和电网电气关系矩阵,计算最优注入流,确定无功注入,根据离散或是连续变量,对无功补偿功率进行确定并判断是否需要调整,已经搭界的节点不再进行优化,调整后,重新计算最优注入流,直到前后两次迭代无功注入不再改变。

[0016] 本发明无功补偿优化算法有着如下优点:

[0017] 1) 相对于以往的算法,本发明方法能够通过 2~3 步的交替迭代,实现问题的求解,计算效率高,能够满足在线应用的需求;

[0018] 2) 本发明方法在交替迭代计算中,不会出现振荡情况;

[0019] 无功补偿优化的目标函数既可以为单目标优化函数,主要用于降低网损,也可以为多目标优化函数,主要包括两部分:即降低网损和消除过载,两个目标函数分别有人工指定的权重;

[0020] 无功补偿优化的控制变量包括电容器投切的组数、静止无功补偿器、静止无功发生器和分布式发电设备的无功注入;其中,电容器投切的组数是离散变量,静止无功补偿器、静止无功发生器和分布式发电设备的无功注入是连续变量;

[0021] 无功补偿优化的计算过程中,首先求得最优注入电流值。最优注入电流值的求解效率很高。然后将最优注入电流值换算为无功补偿实时优化的控制变量。

## 附图说明

[0022] 通过参考以下附图对所采用的优选实施方式的详细描述,本发明的上述目的、优点和特征将变得更显而易见,其中:

[0023] 图 1 表示本发明所涉及的无功补偿控制装置的应用示意图。

[0024] 图 2 是用于说明本发明所涉及的无功补偿控制方法的流程图。

- [0025] 图 3 表示配电网的拓扑连接关系的示意图。
- [0026] 图 4 表示节点注入电流的计算流程图。
- [0027] 图 5 表示无功补偿设备进行无功注入调整的流程图。

### 具体实施方式

[0028] 以下,结合附图对本发明的实施方式进行具体说明。

[0029] 图 1 表示本发明所涉及的配电网无功补偿控制装置的应用示意图。

[0030] 其中,配电网 10,是一般商用的配电网,也可以是含分布式发电的配电网。例如,用于农村、城市、铁路等供电的配电网。

[0031] 多个无功补偿设备 101,设置在配电网 10 中,包含有例如专门用于无功补偿的电容器,或者用于产生电能的发电装置,例如光伏发电设备、太阳能发电设备等,任何具有无功补偿能力的设备。另外,无论离散型无功补偿设备,或是连续型无功补偿设备,只要有无功补偿能力,都可作为本发明的无功补偿设备。例如,电容器投切的组数是离散变量,静止无功补偿器、静止无功发生器和分布式发电设备的无功注入是连续变量。

[0032] 无功补偿控制装置 102,与配电网 10 相连,能够获取配电网 10 的各种参数,如电阻、电抗、拓扑连接关系等,并且通过信息通道 103,从多个无功补偿设备 101 获取其当前的无功补偿状态,并对多个无功补偿设备 101 的无功补偿功率进行控制。

[0033] 图 2 是用于说明本发明所涉及的无功补偿控制方法的流程图。本发明的无功补偿控制方法,主要通过以下几个步骤来实施。

[0034] 首先,根据配电网 10 的配置结构,获取表示配电网的各节点、各支路的拓扑关系的拓扑结构(S201)。作为常见的手段之一,可将网络各节点、各支路的连接关系矩阵化,形成配电网的拓扑关系连接矩阵。

[0035] 接着,根据拓扑结构,建立各支路的支路电流与各节点处的节点注入电流之间的电学关系(S202)。作为常见的手段之一,可将支路电流与节点注入电流矩阵化,形成配电网 10 的电气关系矩阵(S202)。

[0036] 然后,计算当前网损(系统有功损耗),这里,可以采用公知的方法计算当前网损,例如电流的平方乘以阻抗即当前网损。按照使配电网的系统有功损耗小于规定值的方式,计算出安装有各个所述无功补偿设备的各节点处的最优节点注入电流。(S203)

[0037] 最后,根据最优节点注入电流,确定出各个所述无功补偿设备的最优无功补偿功率,并控制该无功补偿设备以该最优无功补偿功率对所述配电网进行无功补偿。(S204)。

[0038] 另外,由于无功补偿设备的无功补偿能力,实际上并不可能是无限的,因此有时确定的最优无功补偿能力会超出无功补偿设备的实际能力。这时,可在所确定的最优无功补偿功率超过了无功补偿设备的最大补偿能力的情况下,将该无功补偿设备的最大补偿功率作为最优无功补偿功率;在所确定的最优无功补偿功率小于了无功补偿设备的最小补偿功率的情况下,将该无功补偿设备的最小补偿功率作为最优无功补偿功率。

[0039] 在这种情况下,由于无功补偿设备并没有能够提供计算出的无功补偿功率,因此系统整体可能并不能达到最优的补偿。这时,可以判断无功补偿设备实际提供的无功补偿功率与计算得出的最优无功补偿功率之间的差值即调整量,是否足够小。如果足够小即可以忽略这种差异,则认为不会对达到最优无功补偿带来实质影响,否则可将最优无功补偿

功率达到最大功率或最小功率的无功补偿设备所处的节点除外,重新进行最优节点注入电流的计算。

[0040] 以下,对上述各个步骤 S201 ~ S204 中可以采取的算法的具体例,进行详细说明。

[0041] (1) 形成拓扑连接关系矩阵 (S201)

[0042] 图 3 表示配电网的拓扑连接关系的示意图。图中,①、②、③等表示配电网的节点,1、2、3 等表示配电网的支路,g1、g2 表示无功补偿设备的注入;图中 1、2、3、4、5、6 是树支,7 是连支。

[0043] 其中,电网拓扑连接矩阵模块,形成网络各节点、各支路的连接关系。用来表示电网拓扑关系的矩阵例如包括道路矩阵 T 和回路矩阵 B,但也可以是其他能够表示出电网拓扑关系的矩阵。其中道路矩阵 T, T 是,定义节点和支路的关联关系的矩阵。回路矩阵 B 是定义支路和独立回路的关联关系的矩阵。

[0044] 当第 j 条支路在第 i 节点到参考点的道路上且方向一致时,道路矩阵的第 i 行,第 j 列元素  $T_{ij} = 1$ ;当第 j 条支路在第 i 节点到参考点的道路上且方向相反时,道路矩阵的第 i 行,第 j 列元素  $T_{ij} = -1$ ;当第 j 条支路不在第 i 节点到参考点的道路上时,道路矩阵的第 i 行,第 j 列元素  $T_{ij} = 0$ 。B 矩阵的元素定义如下:若支路 j 被包含在回路 i 中,则回路矩阵的第 i 行,第 j 列元素  $B_{ij} = \pm 1$ ,否则  $B_{ij} = 0$ 。其中的  $\pm$  表示支路的方向是否与回路的方向相同,若相同则为 +1,否则为 -1。

[0045] 图 3 所示的配电网中,选择节点⑦为参考节点,定义每条支路的方向是从小号节点指向大号节点,从节点①到参考节点⑦所经过的支路包括支路 1、3、5,且支路 1、3、5 的方向与节点①到参考节点⑦的道路方向一致,所以,道路矩阵的第 1 行,第 1、3、5 列元素等于 1;即道路矩阵第 1 行为  $[1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$ 。依次类推,道路矩阵第 2、3、4、5、6 行。最后形成的道路矩阵是:

[0046]

$$\mathbf{T} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & \vdots & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & & 1 & & 1 & & \vdots & 0 \\ & 1 & & 1 & & 1 & \vdots & 0 \\ & & 1 & & 1 & & \vdots & 0 \\ & & & 1 & & 1 & \vdots & 0 \\ & & & & 1 & & \vdots & 0 \\ & & & & & 1 & \vdots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

[0047] 图 3 所示的配电网中,选择节点⑦为参考节点,定义每条支路的方向是从小号节点指向大号节点,定义回路的方向为逆时针,图 2 所示的电网中,连支 7 连接树支 2、3、4、5、6 形成一个回路,回路经过的支路包括 2、3、4、5、6、7,根据支路的方向与回路方向是否一致,判断回路矩阵元素的正负号。图 3 所示的网络最后形成的回路矩阵是:

[0048]

$$\mathbf{B} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & \vdots & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & \vdots & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

[0049] (2) 形成电气矩阵 (S202)

[0050] 接下来建立表示支路电流与节点注入电流的关系的电气矩阵。支路电流指流经

支路的电流,支路电流主要有两部分电流叠加形成,一部分是每个节点注入电流  $g$  对支路电流的支路电流贡献  $f_1$ ,节点注入电流与支路电流贡献的关系,通过道路矩阵  $T$  建立,  $f_1 = T^T g$ ,另一部分是连支上的电流对支路电流的贡献  $f_2$ ,连支上的电流称为回路电流  $f_L$ ,回路电流与支路电流贡献的关系,通过回路矩阵  $B$  建立,  $f_2 = B^T f_L$ ,每一支路的电流  $f_b$  可以看成是  $f_1$  和  $f_2$  的线性叠加  $f_b = f_1 + f_2$

[0051] 根据基尔霍夫定律,回路电流与节点注入电流  $g$  满足关系:  $f_L = -Y_L B Z_b T^T g + Y_L B e$ ,  $e$  表示支路电势源列矢量;  $Z_b$  表示支路阻抗对角阵;  $Y_L$  表示回路导纳矩阵;

[0052] 由此我们建立了支路电流  $f_b$  与节点注入电流  $g$  的关系:

$$[0053] \quad f_b = (T^T - B^T Y_L B Z_b T^T) g + B^T Y_L B e$$

[0054] 节点注入电流发生变化  $\Delta g$ ,会引起支路电流  $\Delta f_b$  发生变化:

$$[0055] \quad \Delta f_b = E \Delta g, \text{ 其中 } E = T^T - B^T Y_L B Z_b T^T$$

[0056] 在步骤 S202 中,建立支路电流与节点注入电流  $g$  的关系,整个电网的网损与支路电流的关系是:

$$[0057] \quad P_{loss} = \sum_{l=1}^b R_{bl} |f_{bl}|^2$$

[0058] 式中,  $R_{bl}$  是支路  $l$  的阻抗,  $b$  是整个电网包含的支路个数。

[0059] (3) 最优节点注入电流计算 (S203)

[0060] 设电网节点  $i$  上装有无功补偿设备 101,无功补偿设备 101 进行优化控制时,意味着,节点注入电流  $g_i$  发生变化,设节点  $i$  的电压  $\dot{V}_i = V_i \angle \theta_i$ ,其中,  $V_i$  是节点  $i$  的电压幅值,  $\theta_i$  是节点  $i$  的电压相角,无功补偿设备的有功功率为  $P_i$ ,无功功率为  $Q_i$ ,节点注入电流与无功补偿设备功率的关系为:

$$[0061] \quad \Delta g_i = \text{conj} \left( \frac{P_i + jQ_i}{V_i \angle \theta_i} \right) = \frac{Q_i}{V_i} \angle (\theta_i - \frac{\pi}{2}) = \frac{P_i}{V_i} \angle \theta_i + I_i \angle \alpha_i$$

[0062] 其中  $\alpha_i = \theta_i - \frac{\pi}{2}$ ,  $I_i$  表示节点注入电流无功部分的幅值

[0063] 根据第 (2) 部分的推导,节点注入电流发生变化会引起支路电流发生变化  $\Delta f_b$ ,其中  $\Delta f_b = E \Delta g$ ;变化后的支路电流为:  $f_b = f_{b0} + E \Delta g$ ,其中,  $f_{b0}$  是初始支路电流。

[0064] 系统有功网损  $P_{loss}$  与节点注入电流  $g$  的关系是:

[0065]

$$P_{loss} = \sum_{l=1}^b R_{bl} \left( \left| f_{bl}^{0real} + \sum_{j=1}^n E_{lj} \frac{P_j}{V_j} \sin \theta_j + \sum_{j=1}^n E_{lj} I_j \cos \alpha_j \right|^2 + \left| f_{bl}^{0imag} + \sum_{j=1}^n E_{lj} \frac{P_j}{V_j} \cos \theta_j + \sum_{j=1}^n E_{lj} I_j \sin \alpha_j \right|^2 \right)$$

[0066] 其中,  $f_{bl}^{0real}$ ,  $f_{bl}^{0imag}$  表示初始支路电流的实部和虚部;  $j$  表示第  $j$  个节点;

[0067] 同时考虑有功网损与负载均衡后,综合网损  $f_{obj}$  与节点注入电流的关系是:

$$[0068] \quad f_{obj} = \sum_{l=1}^b H_{bl} \left( \left| f_{bl}^{0real} + \sum_{j=1}^n E_{lj} I_j \cos \alpha_j \right|^2 + \left| f_{bl}^{0imag} + \sum_{j=1}^n E_{lj} I_j \sin \alpha_j \right|^2 \right)$$

[0069] 其中,  $H_{bl} = \omega_e R_{bl} + \frac{\omega_f}{|f_{bl}|^2}$ ,是综合阻抗,  $f_{bl}$  是支路  $l$  的安全电流,多目标权重满足

$$w_e + w_f = 1, w_e \geq 0, w_f \geq 0$$



[0070] 当  $f_{obj}$  最小时,关于节点注入电流无功部分的幅值  $I$  和节点电压的相角  $\theta$  的偏导数为 0,即:

$$[0071] \quad \frac{\partial f_{obj}}{\partial I} + \frac{\partial f_{obj}}{\partial \theta} = 0$$

[0072] 由于节点注入无功的变化,对节点电压的相角影响较小,因而上式中的第二项  $\frac{\partial f_{obj}}{\partial \theta} = 0$ ,可以忽略。 $\frac{\partial f_{obj}}{\partial I} = 0$ 是最优节点注入电流的求解公式。图 4 表示最优节点注入电流的计算流程,其表示的迭代求解流程是:

[0073] 计算目标函数(网损最小值)  $f_{obj}$ ,得到  $f_{obj}$  的变化量;(S301)

[0074] 其中,当前网损即后述的每次迭代计算的网损,目标网损即优化后的网损、即最后一次迭代计算后希望达到的网损。

[0075] 目标函数的变化量小于一个小数(S302),如  $10^{-5}$ ,则得到最优注入电流(S305),停止计算,否则,继续计算,转到(3);

[0076] 根据  $\frac{\partial f_{obj}}{\partial I} = 0$ ,计算最优节点注入电流(S303);

[0077] 计算潮流(S304),转到(1)继续计算;

[0078] (4)无功补偿设备功率确定(S204)

[0079] 最优节点注入电流确定后,还需要进一步确定无功补偿设备的无功注入。作为本发明,是将配电网 10 所具有的各个无功补偿设备 101 分别等价于虚拟的节点注入电流,从而根据求出的最优节点注入电流,确定出各个无功补偿设备的最优无功补偿功率。根据最优无功补偿功率与无功补偿设备能实际提供的补偿功率之间的关系,可能需要对无功注入进行调整。

[0080] 如图 5 所示是无功补偿设备无功注入调整的流程图:

[0081] 最优补偿无功  $\Delta Q_{opti}^k (i=1,2,..n)$ ,其中  $n$  是参与无功补偿优化的节点总数;对于  $i = 1, \dots, n$ ,该步计算分以下情况:

[0082] (a) 若  $\Delta Q_{opti}^k \gg U_{installi}$ ,则投入无功补偿设备的所能提供的最大无功(S401),节点  $i$  退出优化(S402);其中  $U_{installi}$  是节点  $i$  的无功补偿能力;

[0083] (b) 若  $\Delta Q_{opti}^k < 0$  且  $|Q_{opti}^k| \gg U_{installi}$ ,则投入无功补偿设备所能提供的最小无功(S403),节点  $i$  退出优化(S404);

[0084] (c) 若不是以上两种情况,则投入离  $\Delta Q_{opt}$  最近的无功(S405),该节点继续参与优化。

[0085] 以上根据上述实施例对本发明进行了说明,但本发明并不局限于上述实施例的结构,本发明的范围,当然也包括作为本领域技术人员可获得的各种变形、修正。

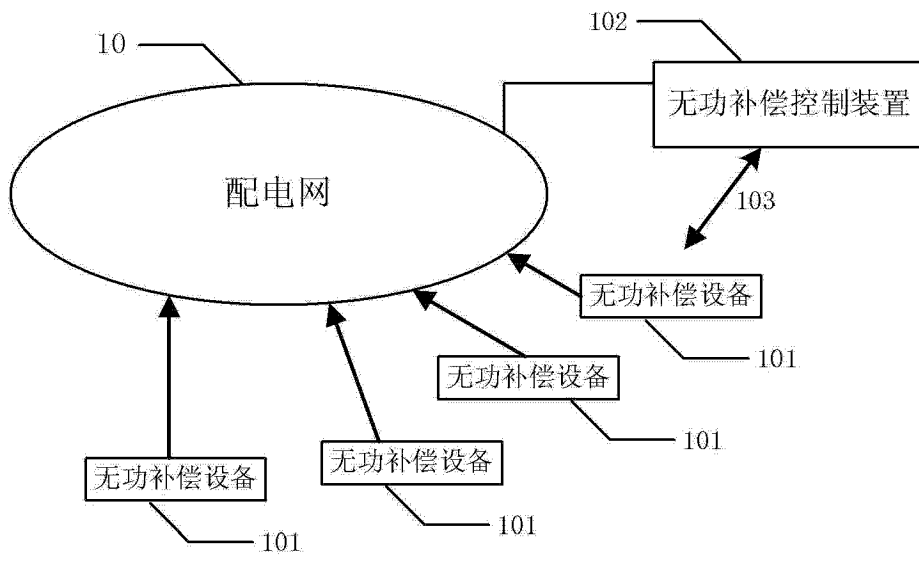


图 1

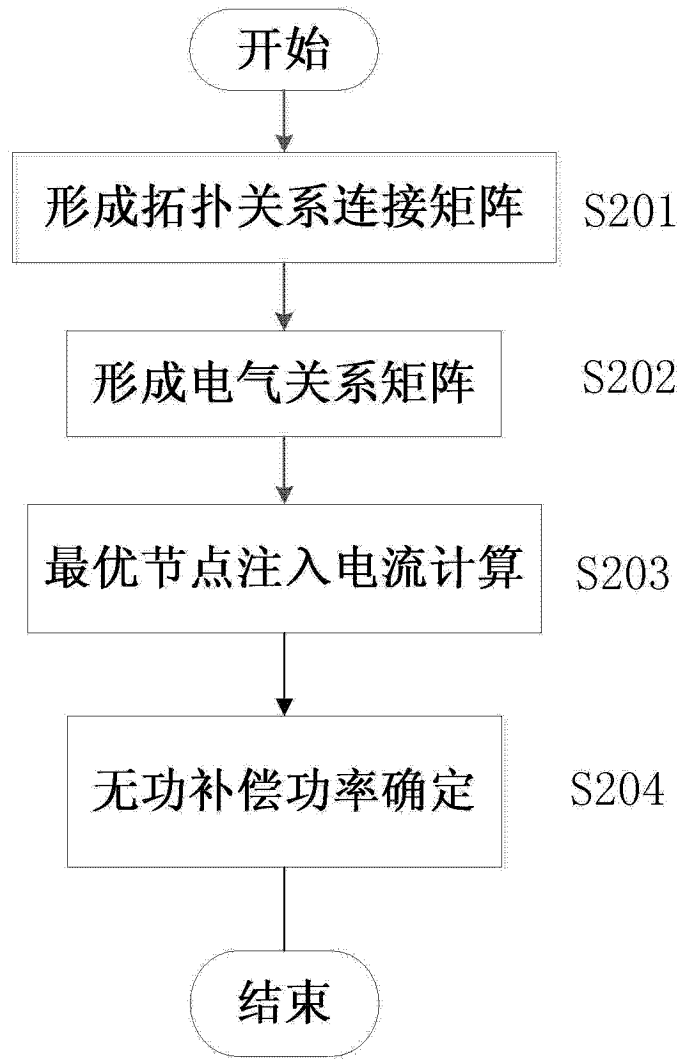


图 2

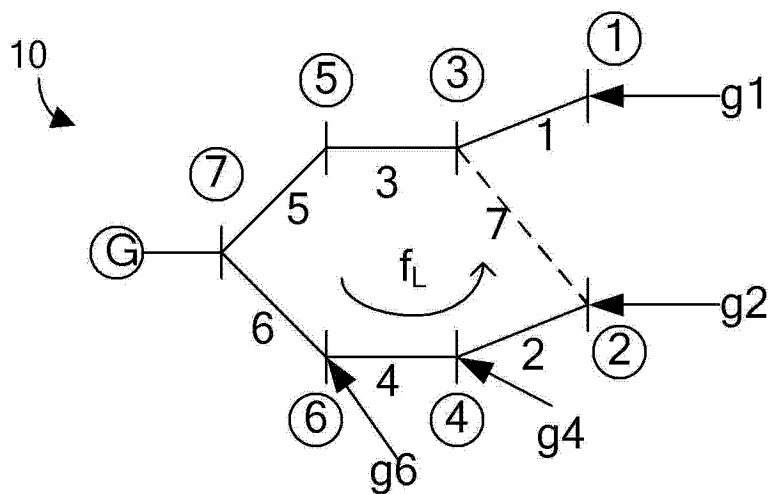


图 3

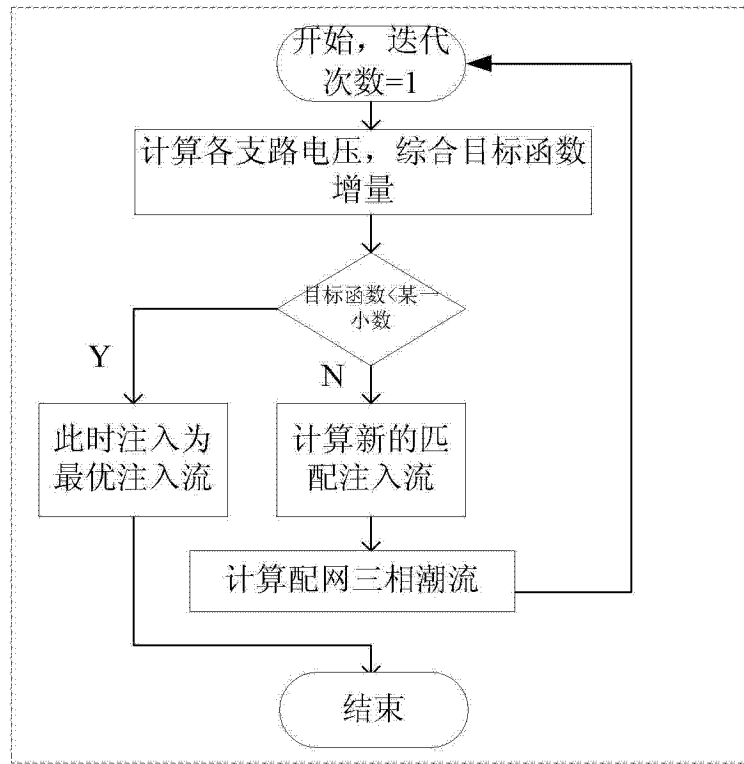


图 4

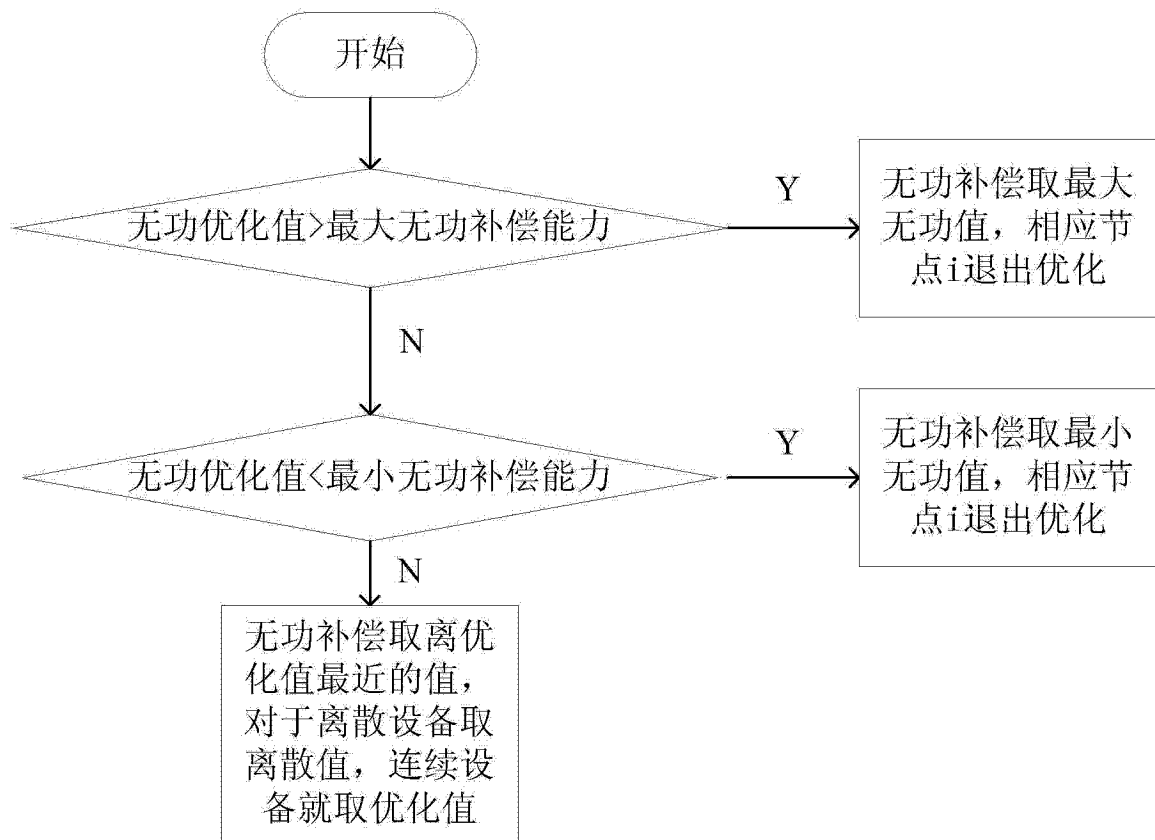


图 5