

基于多智能体的含虚拟发电厂配电网的电压稳定性协调控制

杨志淳¹, 乐健¹, 刘开培¹, 万梓琳²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 中铁十一局集团电务工程有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 应用多智能体协调控制理论来实现含分布式电源的配电网的电压协调控制, 以提高配电网的静态电压稳定性。首先对含分布式电源的配电网进行电压稳定性分析, 根据系统各节点的电压失稳系数判断系统中的电压稳定性薄弱节点; 其次对配电网中的分布式电源进行虚拟发电厂等效, 提出同时利用虚拟发电厂和配电网常规调压设备实现配电网电压协调控制的框架体系。应用多智能体协调控制理论得出电压稳定性协调控制的数学模型, 设计多智能体的反馈控制器。仿真结果验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 虚拟发电厂; 分布式发电; 微电网; 电压控制; 稳定性; 多智能体

中图分类号: TM 92

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.006

0 引言

分布式电源(DG)、微电网(MG)接入配电网运行时将给配电网的电压、电能质量、系统保护和调度运行等带来一系列的影响, 而电压稳定性问题是其中一个重要的方面^[1-3]。近年来出现的虚拟发电厂 VPP(Virtual Power Plants)被认为是更适合和更有效的 DG 接入方式^[4-6]。

VPP 是通过分布式电力管理系统将配电网中地理位置分散或集中的 DG/MG、可控负荷和储能系统合并作为一个特别的电厂参与电网运行, 以期在充分挖掘 DG 为电网和用户所带来的价值和效益的基础上, 同时有效地解决大量 DG 接入后对配电网的冲击和影响。在 VPP 的控制管理系统中, 通常采用多智能体技术^[6]。多智能体系统将大的复杂系统划分为小的彼此相互通信及协调的、易于管理的系统, 具有比其他控制更优越的性能^[7-9]。

现阶段关于 VPP 的相关研究尚处于起步阶段。本文将针对含 VPP 配电网的静态电压稳定性进行分析, 充分利用 VPP 所具有的优点, 研究相应的协调控制方法, 以提高配电网的静态电压稳定性。本文首先对含 DG 的配电网进行了电压稳定性分析, 根据系统各节点的电压失稳系数判断系统中的电压稳定性薄弱节点; 并在薄弱节点接入常规调压设备; 其次对配电网中的 DG 进行 VPP 等效, 并将多智能体控制理论应用于配电网的电压协调控制中, 同时利用 VPP 和配电网常规调压设备实现配电网的多智能体协调控制, 并给出了电压协调控制的体系框架。通过仿真表明本文所提出的电压协调控制方法的正确性和有效性。

收稿日期: 2012-12-17; 修回日期: 2013-08-23

1 含 DG 的配电网电压稳定性分析

本文采用概率特征根电压稳定性分析方法, 将含 VPP 的配电网在稳态运行点线性化, 可得到:

$$\begin{bmatrix} d\Delta x/dt \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, Δx 为状态变量, ΔU 为输入电压变量。

式(1)中消去 ΔU , 得到状态空间方程 $d\Delta x/dt = A\Delta x$, 其状态矩阵 A 可表达为:

$$A = \bar{A} - \bar{B}\bar{D}^{-1}\bar{C} \quad (2)$$

节点电压的直角坐标形式可表示为 $U = [U_R, U_J]^T$ 的形式, 下标 R 和 J 表示实部和虚部, 则输入电压变量 ΔU 可表示为:

$$\Delta U = -\bar{D}^{-1}\bar{C}\Delta x = A'\Delta x \quad (3)$$

设节点电压幅值向量 $U_i = [U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{in}]^T$, 则节点电压幅值偏差列向量与状态变量向量的关系为:

$$\Delta U_i = \begin{bmatrix} U_R \\ U_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_I \\ U_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_R \\ \Delta U_J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_R \\ U_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_I \\ U_R \end{bmatrix} A' \Delta x = A'' \Delta x \quad (4)$$

根据文献[10]中的变换, 可得到节点电压幅值偏差向量与特征值之间的关系为:

$$\Delta U_i = A'' U \Delta Z = W \Delta Z = z_{10} w_1 e^{\lambda_1 t} + z_{20} w_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + z_{n0} w_n e^{\lambda_n t} \quad (5)$$

其中, U 表示矩阵 A 的右特征向量; $W = A'' U = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ 为特征根对节点电压的失稳系数, w_j 的第 i 个元素 w_{ji} ($j=1, 2, \dots, n$) 被称为特征根对节点电压的电压失稳系数, 其大小反映了特征值 λ_i 对节点电压偏差量 ΔU_{ij} 的影响程度, 如果某个 w_{ji} 较大, 则说明相应节点的电压不稳定性较高, 本文将利用

该指标来判断配电网静态电压不稳定程度。

2 含 VPP 的配电网结构

选取配电网中部分 DG 构成 VPP, 配备中央控制器对 VPP 中的 DG 进行控制管理, 典型的含 VPP 和常规调压设备的配电网结构如图 1 所示。

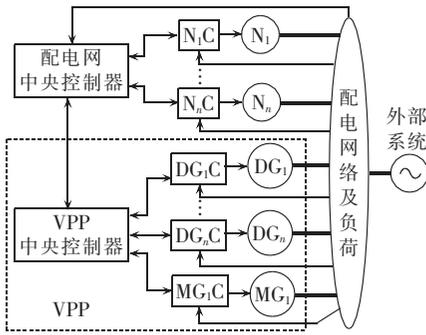


图 1 虚拟发电厂的配电网结构

Fig.1 Structure of distribution network with VPP

图中粗实线表示功率连接, 带箭头的细实线代表信号连接及其流向, 以 N_1, \dots, N_n 表示常规调压设备(如 STATCOM), 相应的控制器以 N_1C, \dots, N_nC 表示; 虚线框内为 VPP, 包括 DG 以及 MG, 图中以 DG_1, \dots, DG_n, MG_1 表示, 相应的控制器以 $DG_1C, \dots, DG_nC, MG_1C$ 表示。

3 基于多智能体配电网电压协调控制

本文提出的基于多智能体的配电网电压协调控制体系如图 2 所示。本文将配电网、VPP、常规电压设备(包括 STATCOM、无功补偿电容器、变压器分接头等)、MG、DG 及负荷等均视为智能体。

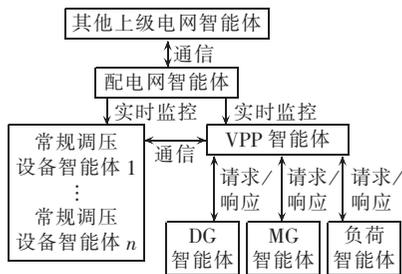


图 2 配电网电压协调控制系统结构

Fig.2 Structure of coordinative voltage control for distribution network

该多智能体系统共分为以下 3 层。

a. 第 1 层为配电网智能体层。配电网智能体进行整个控制体系的组织管理, 其中配电网中央控制器负责进行配电网状态的判断和工作模式的切换(如潮流计算、稳定性分析以及紧急调压等), 同时对下层智能体进行协调控制, 实现 VPP 智能体和常规调压智能体的一致性调节。

b. 第 2 层包括 VPP 智能体和常规调压设备智

能体。其中 VPP 智能体协调 VPP 内部的 MG 智能体、DG 智能体和负荷智能体, 完成上层智能体发布的任务, 同时实现下层智能体的控制策略和参数计算, 并将下层智能体的状态上传至上层智能体; 常规调压设备智能体根据上层智能体发布的任务主要实现配电网局部电压调整。

c. 第 3 层包括 MG/DG 智能体以及负荷智能体。MG/DG 智能体主要是监控 MG 和 DG 的运行状况, 根据 VPP 智能体的任务要求来调节自身的有功和无功出力, 在适当的情况下可以限制孤岛运行, 以达到 VPP 的电压调节目标。负荷智能体与 MG/DG 共同达到 VPP 的电压调节目标, 在 MG/DG 出力达到极限的情况下, 可通过切负荷的方式达到调压的目的。

基于多智能体的配电网协调控制工作流程为: 当配电网出现电压稳定性问题时, 配电网智能体发送调压命令, VPP 智能体接收到调压命令以后, 对其下层的 MG/DG 智能体和负荷智能体发出调压请求, MG/DG 智能体和负荷智能体接收到 VPP 智能体的请求以后, 做出调节有功和无功出力以及切负荷等响应, 以实现 VPP 智能体的调压; 常规调压设备智能体在接收到调压命令以后也进行调压。同时 VPP 智能体与常规调压设备智能体之间通过相互通信以达到协调控制目的。

4 多智能体协调控制方法实现

4.1 问题描述

考虑配电网智能体是由多个 VPP 智能体和常规调压设备智能体构成, 单个智能体状态方程可描述为:

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{A}_{ii}\mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}_{ii}\mathbf{u}_{ii}(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \mathbf{A}_{ij}\mathbf{x}_j(t) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\mathbf{u}_{ii}(t) = \mathbf{K}_{ii}\mathbf{x}_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

其中, $\mathbf{x}_i(t)$ 为智能体 i 的信息状态值; \mathbf{A}_{ii} 、 \mathbf{B}_{ii} 和 \mathbf{A}_{ij} 为已知的系统矩阵; $\mathbf{u}_{ii}(t)$ 为 t 时刻智能体 i 的反馈输入; \mathbf{K}_{ii} 为状态反馈增益矩阵。

协调控制的目的是求得反馈控制器式(7)和协调控制器式(8)使得配电网智能体系统式(9)是渐近稳定的。

$$\mathbf{u}_{ij}(t) = \mathbf{K}_{ij}\mathbf{x}_j(t) \quad i = 1, 2, \dots, n; i \neq j \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = (\mathbf{A}_{ii} + \mathbf{B}_{ii}\mathbf{K}_{ii})\mathbf{x}_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (\mathbf{A}_{ij} + \mathbf{B}_{ij}\mathbf{K}_{ij})\mathbf{x}_j(t) \quad (9)$$

其中, \mathbf{B}_{ij} 、 \mathbf{K}_{ij} 分别为已知的常数矩阵和状态反馈增益矩阵; $\mathbf{u}_{ij}(t)$ 为智能体 j 给智能体 i 的状态反馈输入, 称为协调控制器。

根据块矩阵的 Hadamard 积^[9], 闭环系统可以描

述如下:

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = (\mathbf{A} + \mathbf{B} \circ \mathbf{K})\mathbf{x}(t) \quad (10)$$

$$\mathbf{x}(t) = [\mathbf{x}_1^T(t), \mathbf{x}_2^T(t), \dots, \mathbf{x}_n^T(t)]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} & \cdots & \mathbf{A}_{1n} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} & \cdots & \mathbf{A}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{A}_{n1} & \mathbf{A}_{n2} & \cdots & \mathbf{A}_{nn} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} & \mathbf{B}_{12} & \cdots & \mathbf{B}_{1n} \\ \mathbf{B}_{21} & \mathbf{B}_{22} & \cdots & \mathbf{B}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{B}_{n1} & \mathbf{B}_{n2} & \cdots & \mathbf{B}_{nn} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} & \cdots & \mathbf{K}_{1n} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} & \cdots & \mathbf{K}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{K}_{n1} & \mathbf{K}_{n2} & \cdots & \mathbf{K}_{nn} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} \circ \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11}\mathbf{K}_{11} & \mathbf{B}_{12}\mathbf{K}_{12} & \cdots & \mathbf{B}_{1n}\mathbf{K}_{1n} \\ \mathbf{B}_{21}\mathbf{K}_{21} & \mathbf{B}_{22}\mathbf{K}_{22} & \cdots & \mathbf{B}_{2n}\mathbf{K}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{B}_{n1}\mathbf{K}_{n1} & \mathbf{B}_{n2}\mathbf{K}_{n2} & \cdots & \mathbf{B}_{nn}\mathbf{K}_{nn} \end{bmatrix}$$

其中，“ \circ ”表示 Hadamard 积。

4.2 协调控制方程的求解

多智能体系式(10)达到协调控制的条件是存在正定矩阵 $\mathbf{P}_i (i=1, 2, \dots, n)$ 、矩阵 $\mathbf{P}_{ij} (i \neq j, i < j)$ 、 $\mathbf{K}_{ij} (i, j=1, 2, \dots, n)$ 使得以下矩阵不等式成立:

$$\mathbf{L}(\mathbf{P}_{ij}) \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11} & \mathbf{P}_{12} & \cdots & \mathbf{P}_{1n} \\ \mathbf{P}_{12}^T & \mathbf{P}_{22} & \cdots & \mathbf{P}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{P}_{1n}^T & \mathbf{P}_{2n}^T & \cdots & \mathbf{P}_{nn} \end{bmatrix} > 0 \quad (11)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{P}_{ij}, \mathbf{K}_{ij}) \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{\Pi}_{11} & \mathbf{\Pi}_{12} & \cdots & \mathbf{\Pi}_{1n} \\ \mathbf{\Pi}_{12}^T & \mathbf{\Pi}_{22} & \cdots & \mathbf{\Pi}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{\Pi}_{1n}^T & \mathbf{\Pi}_{2n}^T & \cdots & \mathbf{\Pi}_{nn} \end{bmatrix} < 0 \quad (12)$$

$$\mathbf{\Pi}_{ij} =$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{A}_{ii}^T \mathbf{P}_{ii} + \mathbf{P}_{ii} \mathbf{A}_{ii} + \mathbf{K}_{ij}^T \mathbf{B}_{ii}^T \mathbf{P}_{ii} + \mathbf{P}_{ii} \mathbf{B}_{ii} \mathbf{K}_{ij} + \\ & \sum_{k=1}^{i-1} (\mathbf{K}_{ki}^T \mathbf{B}_{kk}^T \mathbf{P}_{ki} + \mathbf{P}_{ki}^T \mathbf{B}_{kk} \mathbf{K}_{ki}) + \sum_{k=i+1}^n (\mathbf{K}_{ki}^T \mathbf{B}_{ki}^T \mathbf{P}_{ki} + \mathbf{P}_{ki} \mathbf{B}_{ki} \mathbf{K}_{ki}) + \\ & \sum_{k=1}^{i-1} (\mathbf{A}_{ki}^T \mathbf{P}_{ki} + \mathbf{P}_{ki}^T \mathbf{A}_{ki}) + \sum_{k=i+1}^n (\mathbf{A}_{ki}^T \mathbf{P}_{ki} + \mathbf{P}_{ki}^T \mathbf{A}_{ki}) \quad i=j \\ & \mathbf{A}_{ii}^T \mathbf{P}_{ij} + \mathbf{P}_{ij} \mathbf{A}_{jj} + \mathbf{K}_{ij}^T \mathbf{B}_{ii}^T \mathbf{P}_{ij} + \mathbf{P}_{ij} \mathbf{B}_{jj} \mathbf{K}_{ij} + \mathbf{P}_{ii} \mathbf{B}_{ii} \mathbf{K}_{ij} + \mathbf{K}_{ji}^T \mathbf{B}_{jj}^T \mathbf{P}_{ij} + \\ & \mathbf{P}_{ii} \mathbf{A}_{ij} + \sum_{k=1}^{i-1} (\mathbf{K}_{ki}^T \mathbf{B}_{kk}^T \mathbf{P}_{kj} + \mathbf{P}_{ki}^T \mathbf{B}_{kk} \mathbf{K}_{kj}) + \sum_{k=i+1}^{j-1} (\mathbf{K}_{ki}^T \mathbf{B}_{ki}^T \mathbf{P}_{kj} + \\ & \mathbf{P}_{ki} \mathbf{B}_{kk} \mathbf{K}_{kj}) + \sum_{k=i+1}^n (\mathbf{K}_{ki}^T \mathbf{B}_{ki}^T \mathbf{P}_{kj} + \mathbf{P}_{ki} \mathbf{B}_{kk} \mathbf{K}_{kj}) + \mathbf{A}_{ji}^T \mathbf{P}_{ij} + \\ & \sum_{k=1}^{i-1} (\mathbf{A}_{ki}^T \mathbf{P}_{jk} + \mathbf{P}_{ik}^T \mathbf{A}_{kj}) + \sum_{k=i+1}^{j-1} (\mathbf{A}_{ki}^T \mathbf{P}_{jk} + \mathbf{P}_{ik} \mathbf{A}_{kj}) + \\ & \sum_{k=j+1}^n (\mathbf{A}_{ki}^T \mathbf{P}_{jk} + \mathbf{P}_{ik} \mathbf{A}_{kj}) \quad i < j \\ & \mathbf{\Pi}_{jk}^T \quad i > j \end{aligned}$$

由以上可见,一致性问题可转换为求解具有双线性矩阵不等式(BMI)约束的可行性问题:

$$\begin{aligned} \min & \lambda \\ \text{s.t.} & -\mathbf{L}(\mathbf{P}_{ij}) < \lambda \mathbf{I}, \mathbf{B}(\mathbf{P}_{ij}, \mathbf{K}_{ij}) < \lambda \mathbf{I} \end{aligned} \quad (13)$$

考虑到不等式(12)是关于矩阵 \mathbf{P}_{ij} 和 \mathbf{K}_{ij} 的 BMI, 其具体求解步骤如下。

a. 初始化。给定初始值 $k=0, \mathbf{K}_{ij} = \mathbf{K}_{ij}^0 (i, j=1, 2, \dots, n)$ 。

b. 循环。 $k=k+1$, 求解问题 $\min \lambda$ 和 $\text{s.t. } -\mathbf{L}(\mathbf{P}_{ij}) < \lambda \mathbf{I}, \mathbf{B}(\mathbf{P}_{ij}, \mathbf{K}_{ij}^{k-1}) < \lambda \mathbf{I}$ 的解 $\mathbf{P}_{ij} (i, j=1, 2, \dots, n)$, 并令 $\mathbf{P}_{ij}^k = \mathbf{P}_{ij} (i, j=1, 2, \dots, n)$, 继续求解优化问题 $\min \lambda$ 和 $\text{s.t. } \mathbf{B}(\mathbf{P}_{ij}, \mathbf{K}_{ij}^{k-1}) < \lambda \mathbf{I}$ 的解 $\mathbf{K}_{ij} (i, j=1, 2, \dots, n)$, 并令 $\mathbf{K}_{ij}^k = \mathbf{K}_{ij} (i, j=1, 2, \dots, n)$ 。

c. 结束。当 $\mathbf{P}_{ij}^k, \mathbf{K}_{ij}^k$ 同时满足不等式 $\mathbf{L}(\mathbf{P}_{ij}^k) > 0$ 和 $\mathbf{B}(\mathbf{P}_{ij}^k, \mathbf{K}_{ij}^k) < 0$ 时结束。

5 系统仿真分析

5.1 仿真模型及参数

本文以如图 3 所示的 IEEE 33 节点配电系统为对象进行算例验证,其中偶数节点接入模型为文献[11]中的电动机负荷。电路参数见文献[12]。系统电压基准值为 12.66 kV, 视在功率基准值为 10 MV·A, 根节点电压为 1.05 p.u.。在配电网中的节点 17、24、32 接入 DG, 其有功和无功分别为 500 kW、1 000 kvar, 200 kW、300 kvar, 500 kW、1 000 kvar。

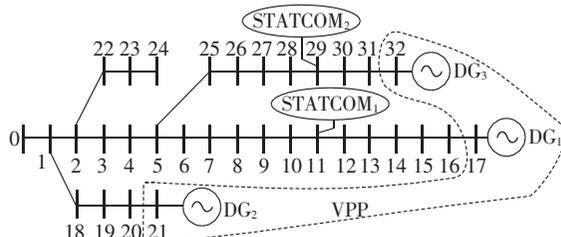


图 3 含虚拟发电厂的 IEEE 33 节点配电网

Fig.3 IEEE 33-bus system with VPP

图 3 中,虚线框图内 3 个 DG 组成 1 个 VPP,在本文的仿真中,VPP 中不包含 MG。

5.2 系统的电压失稳系数

5.2.1 含 DG 的配电网的电压失稳系数

本文中 DG 采用文献[13-14]中的降阶模型,取 $\Delta P, \Delta Q, \Delta U_{od}, \Delta U_{oq}$ 为状态变量。经计算,系统产生 20 个特征根,部分特征根如表 1 所示。

表 1 系统部分特征根

Tab.1 Parts of system eigenvalue

特征根号	实部	虚部
7	1.137	0.915
8	1.137	-0.915
11	2.087	1.286
12	2.087	-1.286

从表 1 可以看出,特征根 7、8、11、12 包含有正实部,可能导致电压失稳。这 4 个特征根对负荷节

点的电压失稳模式系数见表 2。由表 1 和表 2 可知,节点 11 和 29 存在较大的电压不稳定因素,故在这 2 个节点安装常规调压设备(本文使用 STATCOM)最为有效。

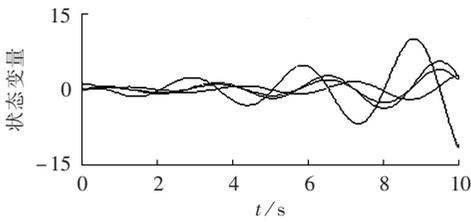
表 2 DG 接入时特征根对节点的电压失稳模式系数
Tab.2 Voltage instability mode coefficient of eigenvalue to node when DG is connected

特征根号	电压失稳模式系数					
	节点 11	节点 12	节点 27	节点 28	节点 29	节点 30
7	1.125	2.638	0.117	0.479	0.884	0.257
8	0.783	1.632	0.152	0.292	0.787	0.349
11	0.479	0.293	1.265	2.425	3.056	0.973
12	0.592	0.125	0.708	1.183	1.308	0.879

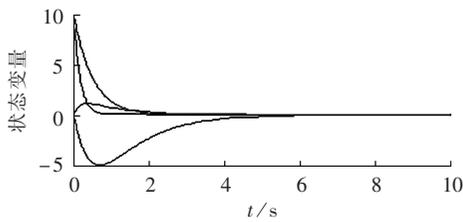
5.2.2 DG 和 STATCOM 同时接入配电网

在节点 11 和节点 29 安装容量为 2 000 kvar 的 STATCOM,并采用文献[15-16]中的模型,取 ΔI_d 、 ΔI_q 、 ΔI_0 、 ΔU_{d_i} 为状态变量。重新对系统进行小信号稳定性分析,得到的 20 个特征值实部均为负数,满足电压稳定性条件,但通过对每个智能体的状态变化轨迹进行分析,得到图 4 波形。

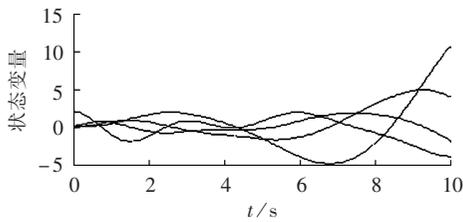
从图 4 可以看出,DG₂ 的状态轨迹最后收敛于零,



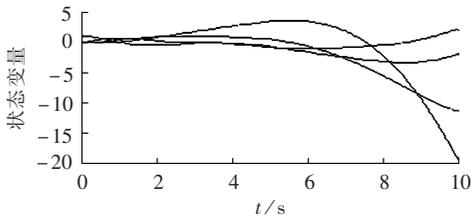
(a) DG₁ 状态变量轨迹



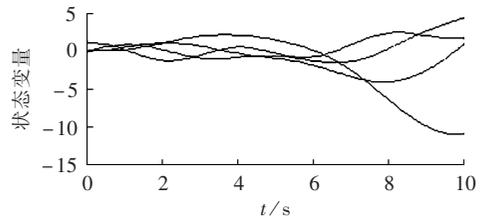
(b) DG₂ 状态变量轨迹



(c) DG₃ 状态变量轨迹



(d) STATCOM₁ 状态变量轨迹



(e) STATCOM₂ 状态变量轨迹

图 4 智能体状态变量轨迹

Fig.4 State variable trajectory of Agent

但 DG₁、DG₃ 以及 STATCOM₁ 和 STATCOM₂ 的状态轨迹最终是发散性的,即系统未达到渐近稳定状态。

5.2.3 VPP 和 STATCOM 采用多智能体协调控制

将配电网中的 DG 进行 VPP 等效,并构建含 VPP 和 STATCOM 的多智能体协调控制体系,按照多智能体协调控制算法,得到的增益矩阵如下:

$$\begin{aligned}
 K_{12} &= \begin{bmatrix} 2.564 & -0.378 & -0.862 & -1.283 \\ -0.489 & 3.482 & -0.857 & -1.573 \\ -0.723 & -0.424 & 2.467 & -0.840 \\ -0.918 & -0.545 & -1.842 & 4.573 \end{bmatrix} \\
 K_{13} &= \begin{bmatrix} 2.474 & -0.832 & -0.976 & -1.471 \\ -0.459 & 1.897 & -0.564 & -1.057 \\ -0.882 & -0.577 & 3.168 & -0.580 \\ -0.423 & -0.791 & -1.439 & 2.849 \end{bmatrix} \\
 K_{14} &= \begin{bmatrix} 1.466 & -0.242 & -0.217 & -0.456 \\ -0.188 & 1.911 & -0.176 & -0.641 \\ -0.322 & -0.329 & 3.269 & -0.812 \\ -1.112 & -0.879 & -0.729 & 1.549 \end{bmatrix} \\
 K_{15} &= \begin{bmatrix} 3.693 & -0.021 & -0.089 & -0.439 \\ -0.044 & 2.369 & -0.114 & -0.290 \\ -0.186 & -0.013 & 2.141 & -0.481 \\ -0.742 & -0.264 & -0.503 & 1.931 \end{bmatrix} \\
 K_{21} &= \begin{bmatrix} 2.828 & -0.353 & -0.412 & -0.575 \\ -1.109 & 2.324 & -0.193 & -0.335 \\ -0.713 & -0.128 & 3.410 & 0.295 \\ 0.096 & -0.942 & 1.254 & 3.271 \end{bmatrix} \\
 K_{23} &= \begin{bmatrix} 0.134 & 1.026 & -0.184 & -0.216 \\ -0.618 & 0.494 & -1.613 & -1.992 \\ -1.050 & -0.274 & 0.763 & -0.315 \\ -2.491 & -0.830 & -0.356 & 3.050 \end{bmatrix} \\
 K_{24} &= \begin{bmatrix} 0.338 & -0.019 & -0.381 & 1.326 \\ 0.838 & 0.441 & -0.624 & -0.898 \\ -3.222 & 0.637 & 1.458 & -3.274 \\ -2.030 & -3.124 & -2.367 & 4.157 \end{bmatrix} \\
 K_{25} &= \begin{bmatrix} 0.642 & -0.133 & 0.064 & -0.135 \\ -0.106 & 0.226 & -0.162 & 0.161 \\ -2.311 & 0.059 & 2.694 & -1.069 \\ -1.731 & -0.397 & 0.383 & 3.436 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$K_{31} = \begin{bmatrix} 0.306 & 0.215 & -0.219 & -0.347 \\ 0.222 & 1.088 & -0.186 & -0.122 \\ -3.241 & -1.392 & 3.197 & -0.469 \\ -0.382 & -2.884 & -3.125 & 3.592 \end{bmatrix}$$

$$K_{32} = \begin{bmatrix} 0.176 & -0.229 & -0.168 & 1.004 \\ 0.151 & 2.413 & -0.157 & -0.243 \\ -1.881 & 0.593 & 1.883 & -3.301 \\ -1.882 & -0.873 & 1.019 & 3.679 \end{bmatrix}$$

$$K_{34} = \begin{bmatrix} 0.224 & -0.128 & -0.902 & 0.214 \\ -0.272 & 1.318 & -0.593 & 0.317 \\ -0.896 & -0.512 & 2.896 & 0.264 \\ -1.261 & -2.896 & -1.127 & 4.663 \end{bmatrix}$$

$$K_{35} = \begin{bmatrix} 2.737 & -0.207 & -0.117 & -0.428 \\ 0.225 & 3.786 & 2.645 & -0.384 \\ -1.256 & -0.700 & 3.195 & -3.194 \\ -1.572 & -0.523 & -2.455 & 3.195 \end{bmatrix}$$

$$K_{41} = \begin{bmatrix} 1.969 & -0.297 & 0.191 & -1.836 \\ 0.175 & 3.524 & -1.794 & 0.258 \\ -1.293 & -1.499 & 3.785 & -2.301 \\ -0.728 & -1.491 & -0.357 & 2.641 \end{bmatrix}$$

$$K_{42} = \begin{bmatrix} 1.753 & -1.094 & -0.482 & -0.818 \\ -0.881 & 1.095 & -0.156 & -0.855 \\ -0.982 & -0.683 & 0.983 & -2.232 \\ -0.983 & -0.826 & -1.139 & 2.472 \end{bmatrix}$$

$$K_{43} = \begin{bmatrix} 1.897 & -0.579 & 0.295 & -0.143 \\ -0.509 & 1.383 & -0.637 & -0.584 \\ -0.774 & -3.224 & 3.695 & -1.231 \\ -3.246 & -1.936 & -0.487 & 4.551 \end{bmatrix}$$

$$K_{45} = \begin{bmatrix} 1.548 & -0.875 & -0.638 & -2.976 \\ -0.487 & 2.418 & -2.254 & 0.217 \\ -1.935 & -1.952 & 2.130 & -1.946 \\ -0.383 & -1.745 & -2.272 & 3.593 \end{bmatrix}$$

$$K_{51} = \begin{bmatrix} 1.138 & -0.346 & -0.625 & -2.484 \\ -1.928 & 1.044 & -1.158 & 1.072 \\ -1.309 & -1.312 & 1.844 & -2.661 \\ -1.564 & 0.299 & -1.227 & 3.047 \end{bmatrix}$$

$$K_{52} = \begin{bmatrix} 1.211 & -0.771 & -0.498 & -1.069 \\ -3.771 & 1.282 & -1.076 & -3.791 \\ -1.282 & -0.728 & 3.771 & -1.282 \\ -0.637 & -0.543 & -0.698 & 1.642 \end{bmatrix}$$

$$K_{53} = \begin{bmatrix} 1.763 & -2.148 & -1.777 & -1.105 \\ -0.893 & 1.018 & -1.296 & -2.419 \\ -0.385 & -0.241 & 2.355 & -0.791 \\ -0.385 & -0.501 & -0.764 & 1.983 \end{bmatrix}$$

$$K_{54} = \begin{bmatrix} 1.049 & -0.135 & -0.196 & -1.175 \\ -0.929 & 1.758 & -1.138 & -1.984 \\ -2.682 & -0.436 & 2.831 & -0.338 \\ -2.962 & -1.588 & -1.421 & 3.795 \end{bmatrix}$$

图 5 给出了采用多智能体对 DG 和 STATCOM 协调控制时,整个系统的状态轨迹图。

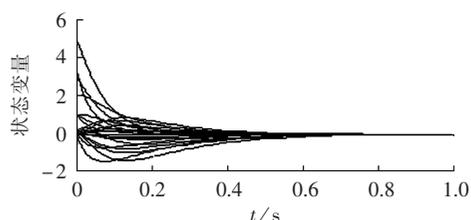


图 5 采用多智能体协调控制算法时
状态变量轨迹

Fig.5 State variable trajectory of multi-Agent
coordinated control algorithm

从图 5 可以看出,当采用多智能体协调控制时,该系统的状态轨迹在 1 s 以后均收敛至零,因此说明在多智能体网络系统达到了渐近一致。

6 结论

本文应用了多智能体理论,对 DG 和常规调压设备进行协调控制,以提高配电网的静态电压稳定性。采用特征根分析法进行了含 DG 配电网的电压稳定性分析,采用基于特征根对节点电压的电压失稳系数来判断电压稳定性薄弱节点。提出了 3 层结构的 VPP 和配电网常规调压设备的协调控制体系结构,基于协调控制理论,得出了电压稳定性协调控制的数学模型,并通过对具有双线性矩阵不等式约束的可行性问题的求解,设计了多智能体的反馈控制器和协调控制器。通过对 DG 和常规电压控制手段分别独立控制以及 VPP 和常规电压控制手段协调控制的仿真,验证了本文所提出的电压协调控制方法的正确性和有效性。本文为在充分发挥 DG 益处的同时,降低对配电网的影响和冲击提供了较好的思路和技术手段。

参考文献:

- [1] SCHULZ C. Business models for distribution power generation with combined heat and power micro-unit[C]//3th International Conference on the European Electricity Market. Warsaw, Poland: [s.n.], 2006:1-8.
- [2] BIGNUCOLO F, CALDON R, PRANDONI V, et al. The voltage

- control on MV distribution networks with aggregated DG units [C] // Proceedings of 41st International Universities Power Engineering Conference. Newcastle Gateshead, UK: [s.n.], 2006: 187-192.
- [3] KATIRAEI F, IRAVANI R, HATZIARGYRIOU N. Microgrid management; controls and operation aspects of microgrid [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 54-65.
- [4] SABOORI H, MOHAMMADI M, TAGHE R. Virtual Power Plant (VPP), definition, concept, components and types [C] // 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Wuhan, China: IEEE, 2011: 1-4.
- [5] PUDJANTO D, RAMSAY C, STRBAC G. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources [J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(1): 10-16.
- [6] 王卓, 殷国富. 基于多代理的智能 ERP 研究及其在电力营销系统的应用 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28(12): 88-93.
WANG Zhuo, YIN Guofu. Multi-Agent based intelligent ERP and its application in electric power marketing system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(12): 88-93.
- [7] 章健, 艾芊, 王新刚. 多代理系统在微电网中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2009, 24(3): 80-87.
ZHANG Jian, AI Qian, WANG Xingang. Application of multi-Agent system in a microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 24(3): 80-87.
- [8] SU Saijun, NIAN Xiaohong, PAN Huan. Trajectory tracking and formation control based on consensus in networked multi-Agent systems [C] // Control Conference (CCC), 2010 29th Chinese. Beijing, China: IEEE, 2010: 4465-4470.
- [9] 郝雨辰, 吴在军, 窦晓波, 等. 基于 IEC61850 的多代理系统在微电网运行控制中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 139-146.
HAO Yuchen, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. Application of IEC61850 based multi Agent system in microgrid operation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 139-146.
- [10] 宗秀红, 张尧, 武志刚. 电压稳定的概率特征根分析 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 61-65.
ZONG Xiuhong, ZHANG Yao, WU Zhigang. Probabilistic eigenvalue analysis for voltage stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 61-65.
- [11] 李欣然, 钱军, 王立德, 等. 配电网集结等效的异步电动机综合负荷模型及其总体测辨建模 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 175-184.
LI Xinran, QIAN Jun, WANG Lide, et al. Synthesis induction motor model of power composite load considering distribution network structure [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 175-184.
- [12] KERSTING W H. Radial distribution test feeders [C] // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. Columbus, OH, USA: IEEE, 2001: 908-912.
- [13] NAGARAJU P K, MILAN P D, TIMOTHY C G. Modeling analysis and testing of autonomous operation of an inverter based microgrid [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.
- [14] 王阳, 鲁宗相, 闵勇, 等. 基于降阶模型的多电源微电网小干扰分析 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 1-8.
WANG Yang, LU Zongxiang, MIN Yong, et al. Small signal analysis of microgrid with multiple micro sources based on reduced order model in islanded operation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 1-8.
- [15] 胡国文, 於锋, 王威. STATCOM 与固定电容组合的高压异步电动机动态无功补偿节能技术 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 75-79.
HU Guowen, YU Feng, WANG Wei. Energy saving technology of dynamic reactive power compensation based on STATCOM and fixed capacitor for HV induction motor [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 75-79.
- [16] 王轩, 林嘉扬, 滕乐天, 等. $d-q-0$ 坐标系下链式 STATCOM 电流控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 48-54.
WANG Xuan, LIN Jiayang, TENG Letian, et al. Current control strategy of chain circuit statcom in $d-q-0$ coordinates [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15): 48-54.

作者简介:



杨志淳

杨志淳(1987-),男,山西运城人,博士研究生,主要从事分布式电源、微电网控制及电能质量研究(E-mail: yangzhichun3600@163.com);

乐健(1975-),男,湖北黄冈人,副教授,博士,主要从事柔性输电技术与电能质量控制技术的研究(E-mail: lej01@mails.tsinghua.edu.cn);

刘开培(1962-),男,湖北荆门人,教授,博士研究生导师,主要从事电力电子技术的研究。

Coordinative voltage stability control based on multi-Agent theory for distribution network with VPP

YANG Zhichun¹, LE Jian¹, LIU Kaipei¹, WAN Zilin²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. CR11G Electric Engineering Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: The multi-Agent coordinated control theory is adopted to realize the coordinative voltage control of distribution network with distributed generations for improving its static voltage stability. The voltage stability of distribution network with distributed generations is analyzed and the weak nodes are identified according to their voltage instability coefficients. A framework of coordinative grid voltage control is proposed, which treats the distributed generations as equivalent VPP (Virtual Power Plants) and utilizes them, together with the conventional voltage regulation equipment, to achieve coordinative grid voltage control. Its mathematical model is derived based on the multi-Agent coordinated control theory and the multi-Agent feedback controller is designed. Simulative results show the correctness and effectiveness of the proposed method.

Key words: virtual power plant; distributed power generation; microgrid; voltage control; stability; multi-Agent