

含多种分布式电源的微电网分层控制策略

黎金英¹, 艾欣²

(1. 绥和工业学院电气与电子工程学院, 越南 绥和 56000;

2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 随着分布式电源接入微电网数量的增加, 微电网系统的稳定性受到了很大的影响; 微电源的运行特性及控制方法、微电源的接入点和容量、微电网运行方式和控制方法、电力电子装置、储能设备和负荷特性等都会影响到电能质量。为了改善微电网的电能质量, 提出了包括上层中心控制器及下层分布式电源信息交互的微电网分层控制策略。微电网中的分布式电源控制由下垂控制、功率控制、电压和电流控制组成。通过 Matlab/simulink 仿真, 对微电网运行中各分布式电源的功率、电压和频率的变化规律进行了分析。仿真结果表明: 分层控制策略能使各分布式电源之间较好地协调, 满足了改善电能质量的要求。

关键词: 分布式电源; 微电网; 电能质量; 分层控制; 控制策略

中图分类号: TM727 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3643(2016)03-0016-06

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2016.03.003>

Hierarchical control strategy of micro-grid with different distributed generation types

LI Jinying (Le Kim Anh)¹, AI Xin²

(1. Electrical and Electronic Engineering, Tuy Hoa Industrial College, Tuy Hoa 56000, Viet Nam; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The stability of micro-grid system is significant influenced with the increase in the number of micro-grid interconnected with distributed generation. The power quality of the grid could be affected by several factors such as the operation characteristics and control method, connection point and capacity of micro-generation, operation mode and control method of the micro-grid, as well as power electronic devices, energy storage devices, and load characteristics. To improve power quality of the micro-grid, the hierarchical control strategy is proposed including the upper center controller and the lower information interaction of distributed generation. Distributed generation control in micro-grid is consisted of the droop control, power control, voltage and current control. By the simulation of Matlab/simulink, analyzes the changing laws of power, voltage and frequency of each distributed generation in the operation of micro-grid. The simulation result shows that hierarchical control strategy makes better harmony among each distributed power, meet the demands of improving the quality of power energy.

Key words: distributed generation; micro-grid; power quality; hierarchical control; control strategy

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2016.03.003

收稿日期: 2016-03-10

作者简介: 黎金英 Le Kim Anh (1979), 男, 工学博士, 主要研究方向为分布式电源和电能质量。

目前,以风力发电、太阳能光伏发电、蓄电池为代表的可再生能源(Renewable Energy, RE)发电系统得到迅猛发展。在这种趋势下,微电网以及分布式能源得到了很大的关注。根据目前的研究,含风电、光伏和蓄电池的RE在并网运行后会给配电网的运行造成一系列影响^[1-2]。RE的接入对系统造成的影响包括谐波、电压不平衡、功率波动以及频率偏差等;另外,系统潮流的大规模变动会造成输电线功率的双向流动,这会使得微电网和主电网间产生功率交换误差;还有,处于孤岛运行状态下的微电网也会给电网的运行带来一定的不利影响。鉴于此,有必要对微电网的控制系统进行深入研究,从而解决上述问题^[3]。

微电网(Microgrid)中的分布式电源通过电力电子设备接入配电系统,其主要设备为逆变器,其控制策略可分成 P/Q 控制、 V/f 控制和下垂控制(Droop control)^[4]。对于输出功率随机的电源,一般采用 P/Q 控制,可以达到最大的能源利用率。对于功率可以调节的电源,控制比较容易,可以实现 V/f 的控制,可用于保证微电网的频率和电压的稳定性。

分层控制(Hierarchical control)在微电网中的应用可以实现微电网和主电网之间的频率同步,电能质量的改善,微电网运行的柔性和可靠性。一般控制系统按照如下方式工作,每个控制层独立完成该层额的控制目标,然后通过通信系统向下一次发出命令。在整个过程中不会影响系统的运行稳定性^[5]。为了改善微电网的电能质量,本文提出了一种微电网分层控制方法,包括微电网的上层电能质量控制和下层微电网中的分布式电源控制的常用方法。分层控制的研究对改善系统电能质量具有重要的理论和工程实践意义。Matlab/simulink的仿真结果表明了微电网中分布式电源的分层控制策略性能优良性。

1 微电网中分布式电源的分层控制策略

1.1 下垂控制原理

下垂控制是微电网中分布式电源常用的方

法。下垂控制方法可分成两种类型^[6-7]:一种是 $f-P$ 和 $V-Q$ 下垂控制方法,根据测量系统得到的频率和电压幅值计算,提出的参考有功功率和无功功率;另一种是 $P-f$ 和 $Q-V$ 下垂控制方法,根据逆变器输出的有功功率和无功功率,提出频率参考值和电压幅值。

本文根据逆变器输出的有功功率和无功功率,提出频率参考值和电压幅值的方法。下垂控制的原理是:分布式电源在线路等效阻抗呈感性时,可以实现 $P-f$ 和 $Q-V$ 的解耦如图1所示。

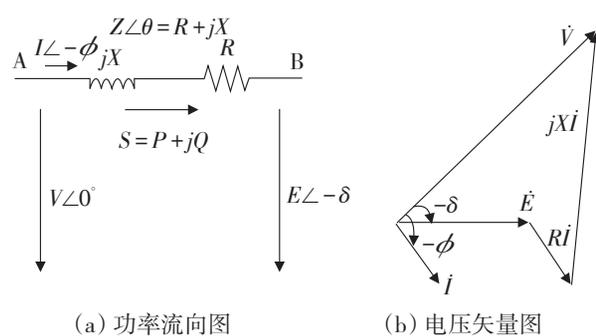


图1 分布式电源并网的等效线路

图1中, δ 为功率角; θ 为线路的阻抗角;假设公共连接点电压为 $E\angle-\delta$; $V\angle-0^\circ$ 为逆变器输出端电压; $Z\angle\theta$ 为逆变器输出阻抗; R 、 X 分别为线路的电阻和电抗; $S = P + jQ$ 为线路传输的视在功率。

由图1可知,逆变器的输出功率如式(1)所示

$$\begin{cases} P = \frac{V^2}{Z} \cos 0 - \frac{VE}{Z} \cos(0 + \delta) \\ Q = \frac{V^2}{Z} \cos \theta - \frac{VE}{Z} \sin(\theta + \delta) \end{cases} \quad (1)$$

当 $Z\angle\theta = R + jX$ 时,式(1)可以写成式(2):

$$\begin{cases} P = \frac{V}{R^2 - X^2} [R(V - E \cos \delta) + XE \sin \delta] \\ Q = \frac{V}{R^2 - X^2} [-RV \sin \delta + X(V - E \cos \delta)] \end{cases} \quad (2)$$

因此,有:

$$\begin{cases} E \sin \delta = \frac{XP - RQ}{V} \\ V - E \cos \delta = \frac{RP + XQ}{V} \end{cases} \quad (3)$$

当分布式电源逆变器通过感性线路连接到微电网时, $R \ll X$, 电阻 R 可以忽略不计。若功率角 δ 很小,则 $\sin \delta \approx \delta$, $\cos \delta \approx 1$ 。式(3)可以写

成式(4):

$$\begin{cases} \delta \approx \frac{XP}{VE} \\ V-E \approx \frac{XQ}{V} \end{cases} \quad (4)$$

对于 $R \ll X$, 功率角 δ 较小, 且 $V-E$ 差异较小, 从式(4)可以看出, 频率(或功率角 δ) 可通过调节有功功率(P)来控制, 而逆变器的电压可通过调节无功功率(Q)来控制。对于分布式电源供电的负荷或微电网, 不同的分布式电源处电压不可能有完全相同的频率和幅值。因此, 将这些分布式电源并联时会产生不可控的有功/无功环流, 这是由它们之间频率和幅值微小差异造成的。

相反, 如果根据各功率变换器产生的有功功率和无功功率所形成的函数, 来控制它们的电压频率和幅值, 整个系统将会找到一个平衡点, 这可以保证控制器具有功率分配能力。因此通过调节分布式电源的有功功率和无功功率出力即可控制微电网的频率和幅值, 这也就衍生出了频率和电压的下垂控制方法, 可以表示为:

$$\begin{cases} f-f_s = -m_p(P-P_s) \\ V-V_s = -n_q(Q-Q_s) \end{cases} \quad (5)$$

式中, f_s —逆变器输出的额定频率;

V_s —逆变器输出的额定电压;

m_p 、 n_q —分别为功率下垂系数;

P —逆变器实际输出的有功功率;

Q —逆变器实际输出的无功功率;

P_s 、 Q_s —额定的有功功率和无功功率。

由式(5)可以看出, 微电网的有功-频率($P-f$)和无功-电压($Q-V$)呈线性关系, 如图2所示。

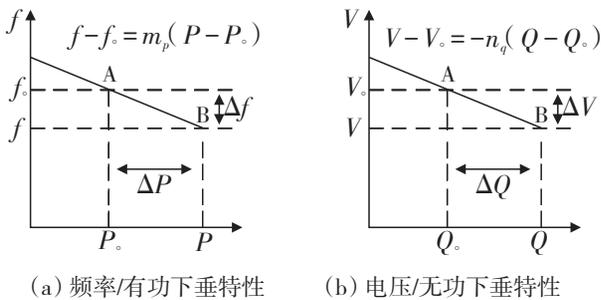


图2下垂控制特性

由图2的下垂控制特性可知, 下垂控制策略是一种有差调节频率以及调节电压的控制。根据微电网内的分布式电源(简称微电源)的有功功率和无功功率分别与电压以及频率之间的线性关系进行控制, 当微电源输出功率变化时, 微电源的运行点相应地从A移动到B。在整个控制过程中, 不需要各微电源之间的通信联系, 所以控制起来比较容易, 因此基于 $P-f$ 和 $Q-V$ 的下垂控制可以实现对分布式电源接口逆变器进行控制。

1.2 微电网控制策略

在参考文献[8]中, 微电网中的分布式电源控制由下垂控制、功率控制、电压控制和电流控制与控制系统组成, 如图3所示。

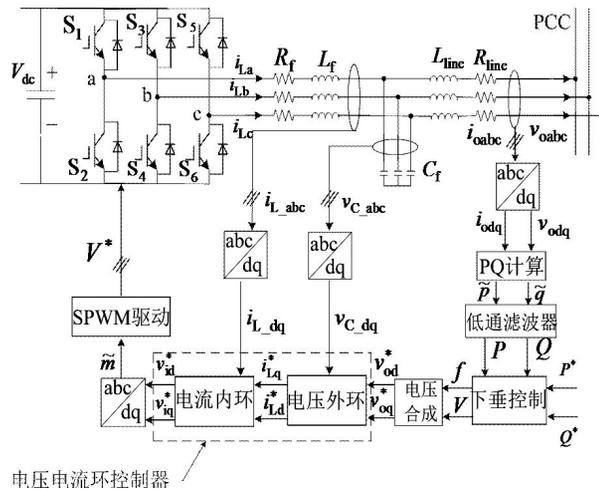


图3 微电网中的分布式电源控制策略

1.3 初级控制的仿真分析

为了论证微电网并网对电网电能质量的影响, 本文利用 Matlab/simulink 对分布式电源并网进行建模和仿真。模型的拓扑结构如图4所示。

通常情况下, 微电网通过静态转换开关(STS)和主电网连接。无论是在并网模式下还是在孤岛运行方式下, 该开关都能为微电网提供一定的保护。

仿真系统由3个分布式电源组成: DG1、DG2和DG3分别为风力发电机、太阳能光伏电池和蓄电池。

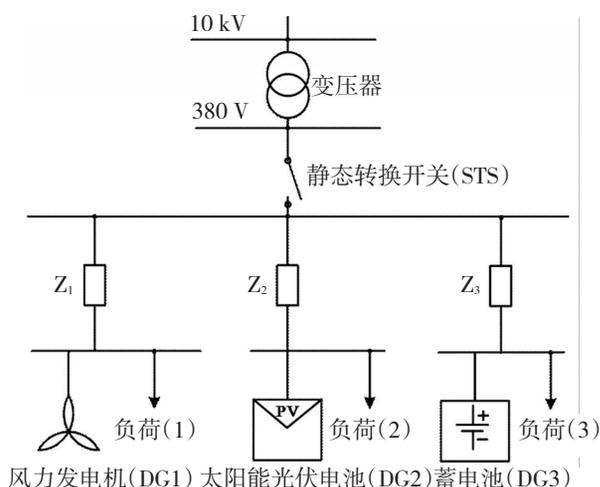


图4 分布式电源接入微电网的拓扑结构

系统的主电路参数:

电网电压 $V_g = 380 \text{ V}$;

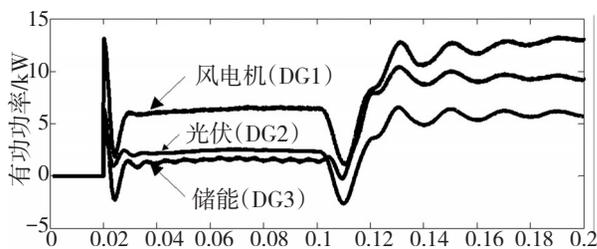
电网频率 $f_g = 50 \text{ Hz}$;

线路阻抗: $Z_1 = 0.18 + j0.51 \Omega$,

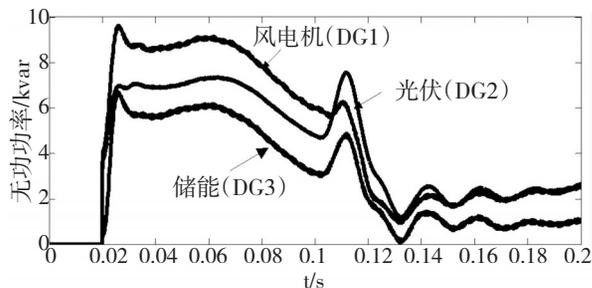
$Z_2 = 0.12 + j0.34 \Omega$,

$Z_3 = 0.08 + j0.22 \Omega$ 。

微电网中分布式电源输出的有功功率和无功功率如图5(a)和图5(b)所示。

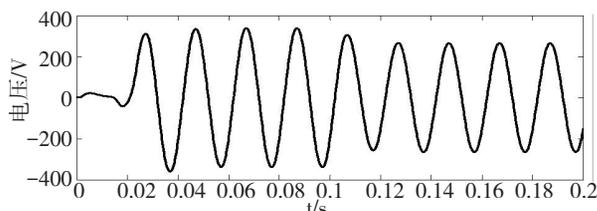


(a) 有功功率

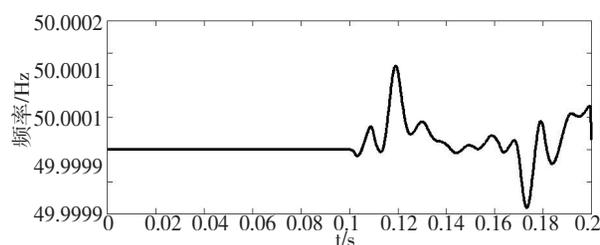


(b) 无功功率

图5 微电网输出的功率

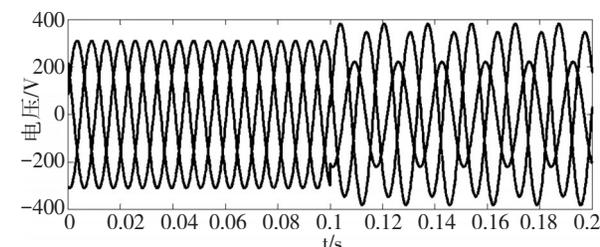


(a) 电压波形

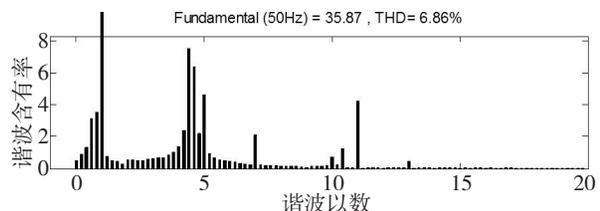


(b) 频率波形

图6 微电网输出的电压和频率



(a) 电压不平衡波形



(b) 谐波波形

图7 微电网输出的电压不平衡和谐波

通过图5、图6和图7中的仿真结果可以得出: 分布式电源接入微电网后,当微电网负荷平衡运行时,在0.02 s到0.1 s之间,DG1输出的有功功率为6 kW,无功功率为7 kvar;DG2输出的有功功率为3 kW,无功功率为6 kvar;DG3输出的有功功率为2 kW,无功功率为5 kvar,(如图5(a)和图5(b)所示)。同时,微电网PCC点的输出电压和频率为:微电网电压为 $V_{Mc} = V_g = 380 \text{ V}$ 、频率为 $f_{Mc} = f_g = 50 \text{ Hz}$ 。因此微电网中的分布式电源的运行稳定,(如图6(a)和图6(b)所示)。在 $t = 0.1 \text{ s}$ 时刻后,分布式电源出力的波动性,DG1输出的有功功率为12 kW;无功功率为2 kvar;DG2输出的有功功率为13 kW,无功功率为2 kvar;DG3输出的有功功率为5 kW,无功功率为1 kvar(如图5(a)和图5(b)所示)。同时,微电网中的分布式电源输出的电压偏差、频率偏差、电压不平衡和谐波,如图6(a)、图6(b)、图7(a)和图7(b)所示。

2 二级控制的仿真分析

根据以上仿真分析,分布式电源初级控制

(Primary control)通过对电压幅值和频率幅值进行控制,使逆变器完成了输出功率的分配,但是这将会引发频率、电压(电压偏差和电压不平衡)、谐波的影响。为了改善微电网,引入了二级控制(Secundary control)方法。在考虑到负荷变化或者分布式电源出力产生波动性的情况下,微电网输出的电压和频率波形如图8所示。

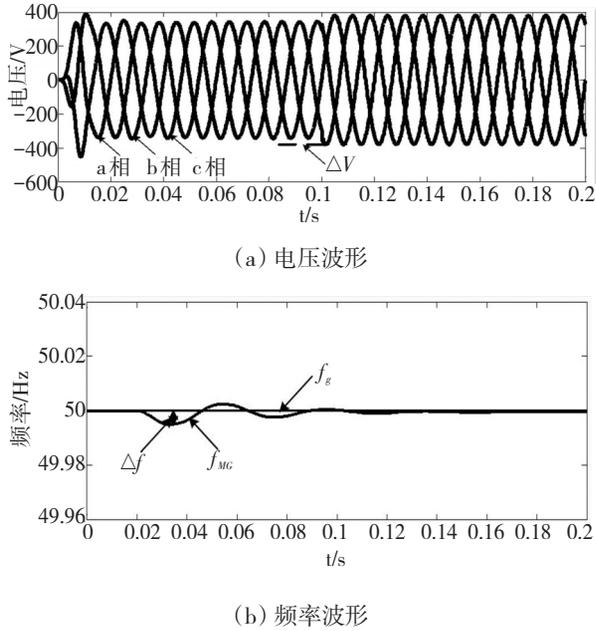


图8 微电网输出的电压和频率

通过图8(a)和图8(b)中的仿真结果可以得出,在0.02 s到0.1 s之间,微电网输出的电压偏差 ΔV 和频率偏差 Δf 的值,如图8(a)和图8(b)所示。根据IEEE Std 1547—2008标准^[9],对于容量为(0→500 kVA)的分布式电源,进行并网时,允许频率偏差为 ± 0.2 Hz,允许电压偏差为 $\pm 10\%$ 。图8(a)和图8(b)中的仿真结果可以看出,微电网电压和频率的偏差不超过IEEE 1547—2008标准所规定的允许极限。在 $t = 0.1$ s时刻后,微电网和主电网的频率和电压幅值基本一致,满足并网条件。

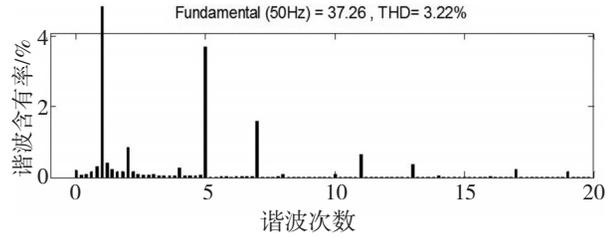
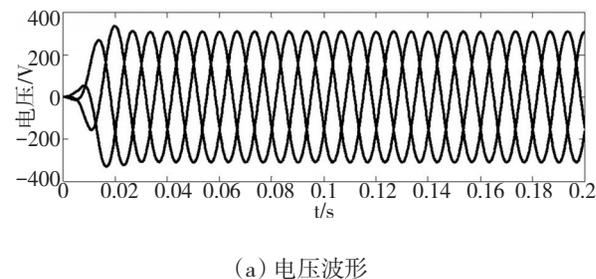


图9 微电网输出的电压和谐波

由图9可以看出,无论是有功功率负荷 P 增加或减小,还是无功功率负荷 Q 增加或 Q 减小,通过二级控制(Secundary control)后,得到微电网输出的电压仍保持平衡和稳定(如图9(a)所示)。同时,微电网内的分布式电源出口电流的谐波畸变量降到3.22%,得到明显的改善效果(如图9(b)所示)。

3 结论

(1)本文对微电网中的分布式电源的基本特点进行了分析研究,利用Matlab/ Simulink软件平台建立了风力并网发电系统、光伏并网发电系统和蓄电池储能并网发电系统的仿真模型,并验证了其对微电网运行的影响,提出了微电网的分层控制策略,包括微电网的上层电能质量控制与下层微电网内的分布式电源控制方法。

(2)在考虑负荷变化或者分布式电源出力产生波动性的情况下,并入电网的微电网系统的频率和电压幅值一直保持稳定,频率偏差、电压偏差、电压不平衡和谐波都在允许范围内。

(3)仿真结果表明,分层控制策略能使各分布式电源之间较好地协调,满足了改善电能质量的要求。

参考文献:

[1] 吴中华. 电池储能技术在可再生能源电站并网中的应用综述[J]. 南通职业大学学报, 2014, 28(2): 94-98.
 [2] 周龙华, 舒杰, 张先勇, 等. 分布式能源微电网电压质量的控制策略研究[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 18-22.
 [3] 李军, 许嘉宁, 孙志强, 等. 微电网主从控制建模仿真[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2012, 10(3): 16-22.
 [4] 黎金英, 艾欣. 微电网分层控制及其电能质量改善研

- 究[D].北京:华北电力大学,2015.
- [5] Estefani'a Planas, Asier Gil-de-Muro, Jon Andreu, et al. General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, (17): 147-159.
- [6] Sha Tian, Xiangqian Tong, Biying Ren. The Control Strategy Based on Improved Droop Method of Microgrid-Connected Inverters [C]//Electrical and Control Engineering (ICECE), Wuhan, China, 2010 :5700-5703.
- [7] Vasquez J C, Guerrero J M, Luna A, et al. Adaptive Droop Control Applied to Voltage- Source Inverters Operating in Grid-Connected and Islanded Modes [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56 (10):4088-4096.
- [8] Palizban O, Kauhaniemi, K. Microgrid control principles in island mode operation [C]//PowerTech (POWERTECH), Grenoble, France, 2013:1-6.
- [9] IEEE 1547—2008, Application guide for IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power system [S].
- (上接第7页)
- (2): 48-53.
- [2] 宋新立,刘万顺,杨奇逊,等. 复杂电力系统多频率异步运行状态的初步分析[J]. 华北电力大学学报, 1997, 24(4):18-23.
- [3] 张保会,张毅刚,刘海涛. 基于本地量的振荡解列装置原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12):67-72.
- [4] 刘福锁,方勇杰. 基于广域实测受扰轨迹的失步解列判据[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17):22-25.
- [5] Kai Sun, Da- ZhongZheng, Qiang Lu. Splitting Strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD- Based Methods [J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2003, 18(2): 912-922.
- [6] GuangyueXu, Vijay Vittal, AnatoliyMeklin, et al. Controlled islanding demonstrations on the WECC System [J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2011, 26(1):334-343.
- [7] 史坤鹏,穆岗,李婷,吕陆. 基于经验模式分解的聚类树方法及其在同调机组分群中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(22):21-25.
- [8] 韩松,徐政,黄弘扬. 利用改进经验模式分解和相关分析综合方法的区间振荡同调性追踪研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(8):2045-2052.
- [9] 张园园,龚庆武,陈道君,等. 应用改进粒子群优化的模糊均值聚类算法的暂态稳定机组分群方法[D]. 电网技术, 2011, 35(9):92-98.
- [10] 吴兴扬,卫志农,孙国强,等. 基于非负矩阵分解的同调机群识别方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (14):59-64.
- [11] 宋洪磊,吴俊勇,冀鲁豫. 基于慢同调理论和希尔伯特-黄变换的发电机在线同调识别[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8):70-76.
- [12] 倪敬敏,沈沉,陈乾. 基于慢同调的自适应主动解列控制(一):理论基础探究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25):4374-4384.
- [13] 李莉,刘玉田. 基于同调分群和自适应判据的失步解列策略[J]. 山东大学学报(工学版), 2007, 37(6): 49-53.
- [14] 潘炜,刘文颖,杨以涵. 采用受扰轨迹和独立分量分析技术识别同调机群的方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25):86-92.
- [15] 汪成根,张保会,郝治国,等. 一种电力系统失步解列面的实时搜索方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (7):86-92.
- [16] 宋洪磊,吴俊勇,吴林峰. 电力系统紧急情况下的动态分区和自主解列策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27 (1):224-229.
- [17] 林济铿,李胜文,吴鹏,等. 电力系统最优主动解列断面搜索模型及算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (13):86-94.
- [18] 宋洪磊,吴俊勇,郝亮亮. 考虑同调约束的电力系统主动解列断面的搜索方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14):49-61.
- [19] 乔颖,沈沉,卢强. 大电网解列决策空间筛选及快速搜索方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22):23-28.
- [20] 倪敬敏,沈沉,李颖,等. 主动解列控制中电网弱连接的一种在线识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4):24-30.
- [21] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2001, 331-335.
- [22] 张艳霞,姜惠兰. 电力系统保护与控制[M]. 北京:科学出版社. 2010:62-63.
- [23] 段振国,高曙,杨以涵,等. 基于图论理论的电力系统解列策略生成方法[J]. 中国电力, 1998, 31(3):7-9.