

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.01.010

两层控制策略在微电网中的运用

姚 靖, 刘 斌, 吴 文, 韩贝贝

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为了提升微电网切换到孤岛状态时的稳定性, 提出了一个两层的混合控制策略。第一层是由连续的本地控制器控制每个分布式电源, 本地控制器的设计是基于李雅普洛夫理论的线性矩阵等式技术, 通过调整分布式电源子系统的设定点, 使其达到最好的性能和合适的运行指数; 第二层是通过分散监控控制进行协调, 分散监控控制是建立在信息融合基础上, 也就是使用广域测量系统, 在有大的扰动情况下转换分布式电源子系统进入一个合适的运转状态。仿真结果表明, 在事先计划的或者偶然情况下微电网的暂态稳定性得到了较大提升。

关键词: 混合系统; 分层控制; 微电网

中图分类号: TM714

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)01-0052-07

The Use of Two-Layer Control Strategy in Microgrid

Yao Jing, Liu Bin, Wu Wen, Han Beibei

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: To enhance the stability of the micro-grid when switching to an island state, a two-layer control strategy is studied. The first layer consisting of continuous local controllers controls each distributed power unit, which is designed by means of the linear matrix equation technique based on Lyapunov theory, and through adjusting the set point of distributed power subsystem, achieves the best performance and suitable running index. The second layer is coordinated through decentralized supervisory control, the decentralized supervisory control is built on the basis of information fusion, which used wide area measurement system, and in the case of large disturbance, the subsystem is converted into a proper operating state. Simulation results show that the transient stability of microgrid in the pre-planned or accidental cases are greatly improved.

Keywords: hybrid system; hierarchical control; microgrid

0 引言

分布式电源系统是由若干个小容量电源模块组成的一个大容量电源系统。与大电网相比, 分布式电源系统的供电安全性和可靠性、电能质量更高, 且符合建设环境友好性和资源节约型社会的要求。微电网^[1-2]是以分布式发电技术为基础, 由一簇负荷、分布式电源、储能装置通过电气网络紧密集成

为单一可控的供电系统, 可同时向负载供给电能和热能。因此, 它是智能电网的重要组成部分。微电网既可以通过单一接口与大电网并网运行, 也可以配合储能单元稳定自主地孤岛运行, 即其有2种运行模式: 并网运行和离网运行。离网运行状态就是一个孤岛运行模式。

独立微电网(孤岛运行模式)可能是由一些扰

收稿日期: 2014-12-09

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2045), 国家自然科学基金资助项目(61174075)

作者简介: 姚 靖(1988-), 男, 安徽合肥人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为基于混合系统的微电网控制及应用,

E-mail: 356133268@qq.com

动造成,如错误或者预先计划的切换事件^[3]。从主电网断开后微电网进入暂态,暂态的响应高度取决于以下几点:1)孤岛之前的运行状态;2)启动孤岛运行的触发事件的类型;3)微电网中分布式电源单元的类型。为了微电网在孤岛运行模式下能保持运行,并且满足相应的负载需求,需要提高事先计划的或意外事件下的微电网动态响应。为了提升微电网切换到孤岛状态时的稳定性,本文提出了一种两层混合控制策略。

1 问题陈述

N 个分布式电源子系统的微电网动态模型^[6]为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i(t) = (\mathbf{A}_{i,s} + \Delta\mathbf{A}_{i,s})\mathbf{x}_i(t) + (\mathbf{B}_{i,s} + \Delta\mathbf{B}_{i,s})\mathbf{u}_{i,s}(t-\tau) + \\ (\mathbf{D}_{i,s} + \Delta\mathbf{D}_{i,s})\omega_i(t), & (1.1) \\ z_i(t) = \mathbf{C}_{i,s}\mathbf{x}_i(t), & (1.2) \\ \zeta_i(t) = F(m_i(\delta), m_i(V), m_i(\sigma), m_i(\bullet)), & (1.3) \\ \Sigma_i = \{x_{i,0}, (i_1, t_1), \dots, (i_s, t_s), \dots\}, & (1.4) \\ \Delta\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{A}_{i,s}\mathbf{x}_i(t), t = t_s, i = 1, 2, \dots, N. & (1.5) \end{cases}$$

式中: \mathbf{x}_i 为第 i 个分布式电源子系统的连续状态; $\mathbf{A}_{i,s}$, $\mathbf{B}_{i,s}$, $\mathbf{C}_{i,s}$ 和 $\mathbf{D}_{i,s}$ 分别为第 i 个分布式电源的系统矩阵、输入矩阵、输出矩阵和扰动矩阵; $\Delta\mathbf{A}_{i,s}$, $\Delta\mathbf{B}_{i,s}$, $\Delta\mathbf{D}_{i,s}$ 为参数不确定矩阵,非线性条件下的不确定性和暂态状态可通过不确定参数来描述; τ 为时滞, $0 \leq \tau < +\infty$, 本文取 $\tau=0$; $\mathbf{u}_{i,s}$ 为控制输入的第 i 个 DG 单元的第 s 个切换模式; z_i 和 ω_i 分别为第 i 个 DG 单元的输出和扰动; ζ_i 为离散控制策略中的第 i 个子系统,它是利用信息融合技术,由选定的与稳定性相关的特征指数 $m_i(\cdot)$ 组成; F 为矩阵函数; Σ_i 为第 i 个 DG 单元子系统切换的一系列规则,其中, $\mathbf{x}_{i,0}$ 为初始状态, (i_s, t_s) 为 $[t_s, t_{s+1})$ 时第 i 个 DG 单元的第 s 个控制模式,离散模式切换是通过离散监控控制策略来完成; $\Delta\mathbf{x}_i(t)$ 为第 i 个子系统的连续状态在切换时间点的暂态变化; $\mathbf{A}_{i,s}$ 为切换矩阵。

2 离散监控控制策略

微电网既可以和大电网互联又可以独立运行。无论微电网的运行模式是什么,快速和灵活的管理控制策略对系统的运行有直接的影响,如暂态电压稳定、电能质量等。本文根据选定的特征指数,使用信息融合技术来建立离散监控控制策略。为了获得特征指数,需在微电网的选定位置在线测量连续的特征参数和离散的事件信息。

通过 4 个过程建立离散监控控制策略^[3-4],如图

1 所示。具体步骤如下:1)在选定位置在线测量特征指数(特征选择层),特征指数要具有代表性;2)构建基本概率函数(数据融合层),即处理特征指数;3)利用基于 D-S (dempster-shafer) 证据理论的信息融合技术来评估暂态性能(特征融合层),即融合概率函数;4)组成离散监控控制策略(策略融合层),即整合信息^[5-6]。

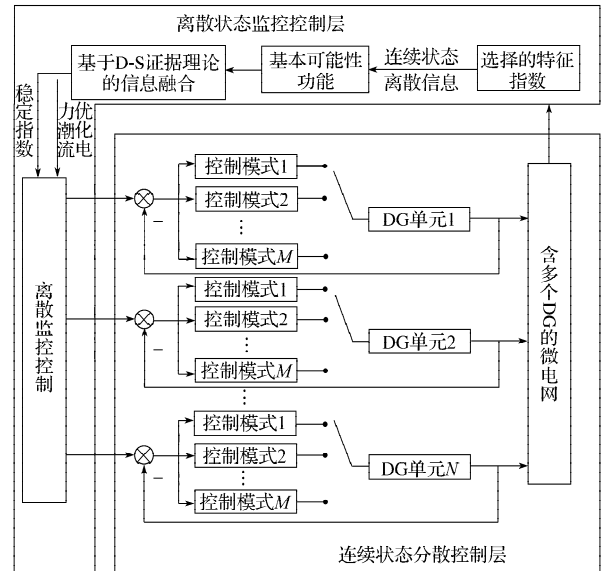


图1 微电网分层控制框图

Fig. 1 Block diagram for hierarchical control of microgrid

2.1 特征指数的选择

2.1.1 与暂态稳定性有关的特征指数

当微电网进入孤岛状态,在含旋转电机的 DG 单元中,发电机的转子角会经历大的偏移。因此,发电机的最大转子角可作为暂态稳定性的一个特征。然而对于含有很多电机的大微电网,在多对机器中监控所有相关的转子角是困难的,因此本文使用一个等效的暂态稳定特征值表示转子角。微电网中所有含旋转电机 DG 单元被分成 2 簇,分别为临界簇和平衡簇。平均转子角由平衡簇的惯性来计算。而与平均转子角相关的每个临界发电机的转子角可以作为暂态稳定的特征指数。特征指数计算公式为:

$$\begin{cases} C_i(\delta) = 0, i \in S; \\ C_j(\delta) = \frac{|\delta_s - \delta_j|}{\delta_{j,0}} = \frac{\left| \frac{\sum_{i \in S} M_i \delta_i}{\sum_{i \in S} M_i} - \delta_j \right|}{\delta_{j,0}}, j \in U. \end{cases} \quad (2)$$

式中: S 为平衡簇; U 为临界簇; M_i 和 δ_i 分别为平衡簇中第 i 个发电机在扰动后运行状态下的转动惯量和转子角; $\delta_{j,0}$ 为临界簇的第 j 个发电机在扰动前运行状态下的转子角; δ_j 表示临界簇的第 j 个发电机在扰动后运行状态下的转子角。

2.1.2 与电压稳定相关的特征指数

在孤岛状态下,微电网电压必须保持在可接受的范围内,并且要预防电压崩溃。因此,本文将扰动前后的母线电压变化作为电压稳定性特征指数。电压稳定性特征指数为

$$C_{st}(V) = \frac{|\Delta V_i|}{V_{i,0}} = \frac{|V_i - V_{i,0}|}{V_{i,N}} \quad (3)$$

式中: $V_{i,0}$ 和 V_i 分别为第 i 个母线在扰动前稳定运行状态下的电压和在扰动后暂态下的电压; $V_{i,N}$ 是第 i 个母线的正常电压。

2.1.3 与最优的电力潮流相关的特征指数

大电力系统,往往分配大的机组作为旋转储能装置。而在微电网中, DG 单元没有单独作为旋转储能单元或者后备电源。因此,在孤岛切换暂态下,微电网既需要足够的无功功率来维持电压在容许的范围内波动,还需要最佳的有功功率来维持频率在限定的范围内波动,这样就能保证微电网系统的电压质量满足负荷要求和系统功率动态平衡。孤岛的暂态程度高度依赖于微电网中的 DG 单元。从电源和控制的角, DG 单元可分为 2 种主要类型:可调度单元和不可调度单元。可调度 DG 单元能对有功功率和无功功率控制作出快速反应,并能满足有功功率和无功功率指令。且它是通过电力变流器连接到微电网,在 DG 侧含有储能装置,例如带有背靠背变流器的可变速风力发电机或带有变流器的燃料电池^[7]。不可调度 DG 单元对有功功率和无功功率控制的反应速度较慢。在暂态下或作为非受控源时,不可调度 DG 单元的反应时间主要依赖于主要电力源,如光电源或固定速度的风力发电机,依赖太阳能或者风能输入来发电,而这些能源是不可预测的时变的自然能。在孤岛暂态下,不可调度 DG 单元只能在微电网电力平衡的稳定状态下或小扰动下满足负载需求。而可调度 DG 单元如燃气涡轮发电机,它的反应时间是在命令下达后的 50 ms 到几秒内。由于可调度 DG 单元对有功功率和无功功率控制的快速反应,需设定一个有功功率和无功功率的最大能源储存的限定值,而限定值的设置取决于母线功率。每个选定母线的功率可以通过如下方法计算:将 DG 作为负载,利用最优潮流(optimal power flow, OPF)切负荷算法计算 DG 的最大容量,同时母线功率要满足网络电压约束、热约束,以及各种 DG 容量约束,而故障率水平约束直接包含在 OPF 公式中作为简单的非线性不等式约束。作为特征指数的每个选定母线功率需求公式如下:

$$\begin{cases} C_i(P) = |P_i - P_{i,0}|/P_{i,0}; \\ C_i(Q) = |Q_i - Q_{i,0}|/Q_{i,0}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{i,0}$, $Q_{i,0}$ 分别为在扰动前稳定运行下第 i 个母线的有功功率和无功功率; P_i , Q_i 分别为在扰动后暂态运行下第 i 个母线的有功功率和无功功率。

2.2 构建基本概率函数(数据融合层)

基本概率函数的构建如下:

$$m_h(\delta) = C_h(\delta) / \left[\sum_{h=1}^N C_h(\delta) + 4(1-\gamma_{h,1})(1-\alpha_1\beta_1) \right], \quad (5)$$

$$m_h(V) = C_h(V) / \left[\sum_{h=1}^N C_h(V) + 4(1-\gamma_{h,2})(1-\alpha_2\beta_2) \right], \quad (6)$$

$$m_h(P) = C_h(P) / \left[\sum_{h=1}^N C_h(P) + 4(1-\gamma_{h,3})(1-\alpha_3\beta_3) \right], \quad (7)$$

$$m_h(Q) = C_h(Q) / \left[\sum_{h=1}^N C_h(Q) + 4(1-\gamma_{h,4})(1-\alpha_4\beta_4) \right]. \quad (8)$$

式(5)~(8)中: $m_h(\delta)$, $m_h(V)$, $m_h(P)$ 和 $m_h(Q)$ 分别为第 h 个 DG 单元子系统的转子角、电压、有功功率和无功功率的稳定性指数;

$\gamma_{h,1}$, $\gamma_{h,2}$, $\gamma_{h,3}$ 和 $\gamma_{h,4}$ 分别为第 h 个 DG 单元子系统上述特征指数的相应加权系数, $\gamma_{h,i}$ ($i=1, 2, 3, 4$) $\in [0, 1]$, 通过比较不同特征指数的优先次序,来分配加权系数 $\gamma_{h,i}$ 给不同的基本概率函数,例如,暂态稳定性指数(转子角)与其他 3 个指数(电压、无功功率和有功功率指数)相比,优先级最高,因此,它的加权系数必须是最大的,而电压稳定性指数低于暂态稳定性指数,高于其余两者,它的加权系数是第二大的,最优潮流指数(无功功率和有功功率指数)的加权系数最小;

$\alpha_1 \sim \alpha_4$ 分别为所有 DG 单元子系统的转子角、电压、有功功率和无功功率 4 个稳定性指数的最大值,即

$$\alpha_1 = \max \{C_h(\delta)\}, \alpha_2 = \max \{C_h(V)\},$$

$$\alpha_3 = \max \{C_h(P)\}, \alpha_4 = \max \{C_h(Q)\}, h=1, 2, \dots, N;$$

$\beta_1 \sim \beta_4$ 分别为上述 $\alpha_1 \sim \alpha_4$ 的最大相关指数,即

$$\beta_1 = W_{h,1} \alpha_1 / \sum_{h=1}^N C_h(\delta), \beta_2 = W_{h,2} \alpha_2 / \sum_{h=1}^N C_h(V),$$

$$\beta_3 = W_{h,3} \alpha_3 / \sum_{h=1}^N C_h(P), \beta_4 = W_{h,4} \alpha_4 / \sum_{h=1}^N C_h(Q),$$

其中 $W_{h,i}$ 为环境系数,其依赖条件为,1) 扰动前的运行状态,2) 扰动的事件类型,3) 微电网的 DG 单元的类型和位置。

基于 D-S 证据理论建立上述基本概率函数的原则如下:

1) 特征指数在基本概率函数中必须作为独立的

可变因素。

2) 每个基本概率函数的概率分配必须要有未知部分,未知部分是

$$m_h(\Theta) = 3(1-\gamma_h)(1-\alpha\beta) \left/ \left[\sum_{h=1}^N C_h + 3(1-\gamma_h)(1-\alpha\beta) \right] \right.,$$

其中, Θ 为识别框架, Θ 的每一个元素都是独立的。在不同的情况下, 加权系数和环境系数应当被考虑进基本概率函数中, 基本概率函数不仅包含定量特征指数, 还包含定性的信息。

3) 式(5)~(8)基本概率函数的概率分配必须满足 $m(\Phi)=0, \sum_{A \subseteq \Theta} m(A)=1$, 其中, Φ 为转子角或电压或有功功率或无功功率。

2.3 基于 D-S 证据理论的信息融合(特征融合层)

所有 DG 单元的转子角、电压、有功功率、无功功率 4 种基本概率函数见式(5)~(8)。通过上述融合标准, 2 个基本概率函数的融合式为:

$$m(c) = \begin{cases} 0, & c = \Phi; \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j = c} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = c} m_1(A_i) m_2(B_j)}, & c \neq \Phi. \end{cases} \quad (9)$$

式中: $m_1()$ 和 $m_2()$ 为任意 2 个基本概率函数; $m(c)$ 为融合后的概率函数。融合的结果是每个 DG 单元的整合后的稳定性能指数 $m_h(\cdot)$ 。

2.4 组成离散监控控制策略(策略融合层)

微电网的运行分为联网运行模式和离网运行模式。不同运行模式下, 微电网的控制策略不同。

当微电网处于联网运行模式时, 其与大电网连接策略如下:

1) 微电网频率受主电网控制, 且大部分 DG 单元频率与系统频率同步。

2) 总负载的有功功率需求是由主电网和所有 DG 单元来决定。DG 单元间的贡献水平是以经济性为基础。因此, 负载变化时有功功率由主电网补偿。

3) 电压的维持和无功功率的需求由主电网、所有 DG 单元和其他的无功功率源满足。各种 DG 单元的无功输出是以电压波形为基准来动态调整。

和联网运行模式不同的是, 微电网暂态模式(离网运行)切换策略如下:

1) 与主电网分离后, 分布系统的频率必须要通过微电网中的所有 DG 单元来维持。独立微电网的频率变化是由有功功率的平衡状况决定, 并且总有功功率的需求是由所有 DG 单元提供。如果在孤岛运行前, 所有 DG 单元的发电量低于(高于)微电网负载需求, 将会导致频率的降低(提高)。在切换

暂态下, 根据稳定指数大小, 有功功率控制策略应尽可能通过切换有功功率控制器的设定来分配可调度 DG 源的有功功率输出, 从而满足负载有功功率的需求, 并通过励磁或调速系统适当地调节不可调度 DG 源来降低小功率振荡。调度原则是, 有较大有功功率指数或综合性稳定指数的 DG 单元能快速通过可调度 DG 源来提供更多有功功率补偿。

2) 从主电网分离后, 分布系统的电压必须要通过微电网中的所有 DG 单元和无功功率源来维持。独立微电网母线电压的变化取决于无功功率的平衡状况。对输出功率能快速反应的可调度 DG 单元或无功功率源, 会分配大部分的无功功率来满足它们的需求。在暂态下, 根据每个 DG 单元电压/无功功率稳定指数和综合稳定性指数的大小, 无功功率控制策略应当通过切换无功功率控制器的设定来分配多数的无功功率输出给可调度 DG 源或者无功功率源, 并且适当地调整不可调度 DG 源来维持端子电压。调度原则是, 有较大电压/无功功率稳定指数的 DG 单元应尽可能快地通过可调度 DG 源来供给更多的无功功率。

因此, 离散监控控制策略可用一个切换函数表示, 即

$\zeta_h(t) = F(m_h(\delta), m_h(V), m_h(P), m_h(Q), m_h(\cdot))$ 。(10) 分别给 $m_h(\delta)$, $m_h(V)$, $m_h(P)$, $m_h(Q)$ 和 $m_h(\cdot)$ 设置一个临界值。根据临界值, 其被分为高和低 2 种指数, 例如 $m_h(\delta)$ 为

$$m_h(\delta) = \begin{cases} \text{high, if } m_h(\delta) > \delta_{\text{thr}}; \\ \text{low, if } m_h(\delta) \leq \delta_{\text{thr}}. \end{cases}$$

因此, 离散监控控制策略通过 $m_h(\delta)$, $m_h(V)$, $m_h(P)$, $m_h(Q)$ 和 $m_h(\cdot)$ 的高低指数进行排列组合, 组合成 32 种切换控制模式。

3 DG 单元连续 H_∞ 分散鲁棒控制器设计

虽然每个 DG 单元的动态模型不同, 但本文的目的是为各种各样的 DG 单元来研究一个普遍的设计底层连续控制器方法, 因此, 各种 DG 单元模型采用一般的小信号线性动态模型, 并且由非线性条件引起的参数不确定性就说明为不确定。连续动态模型由式(1.1), (1.2) 和 (1.5) 表示。参数不确定性假设如下。

假设 1 这里考虑的参数不确定性是范数有界形式, 即

$$[\Delta A_{i,s}, \Delta B_{i,s}, \Delta D_{i,s}] = H_{i,s} F_{i,s}(t) [E_{i,s,1}, E_{i,s,2}, E_{i,s,3}], \quad (11)$$

式中: $H_{i,s}$, $E_{i,s,1}$, $E_{i,s,2}$, $E_{i,s,3}$ 是已知适当大小的常量矩阵; $F_{i,s}(t)$ 是未知的矩阵函数, 带有 Lebesgue 可测量元

素, 并且满足 $F_{i,s}^T(t)F_{i,s}(t) \leq I_i$, 其中 I_i 是单位矩阵。

每个 DG 单元的本地连续状态反馈控制器设计为

$$u_{i,s}(t) = k_{i,s} x_i(t), \quad (12)$$

式中, $k_{i,s}$ 为第 i 个 DG 单元子系统的第 s 个切换模型的控制器参数。

整理式 (11) 和 (12) 可得, 第 i 个闭环控制子系统的第 s 个切换模型为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= [\bar{A}_{i,s} + H_{i,s} F_{i,s}(t)(E_{i,s,1} + E_{i,s,2} k_{i,s})] x_i(t) + \\ &\quad (D_{i,s} + \Delta D_{i,s}) \omega_i(t), \\ z_i(t) &= C_{i,s} x_i(t), \quad \Delta x_i(t) = A_{i,s} x_i(t), \quad t = t_s, \\ \bar{A} &= A_{i,s} + B_{i,s} k_{i,s}, \end{aligned}$$

$$\Delta \bar{A}_{i,s} = \Delta A_{i,s} + \Delta B_{i,s} k_{i,s} = H_{i,s} F_{i,s}(t)(E_{i,s,1} + E_{i,s,2} k_{i,s}) \quad (13)$$

为控制系统式 (13) 定义多重李雅普洛夫函数

$$V_{i,s}(t) = x_i^T(t) P_{i,s} x_i(t),$$

式中, $P_{i,s}$ 为对称正定加权矩阵。

考虑初始条件, H_∞ 性能与输出相关,

$$\int_0^{t_f} z_i^T(t) z_i(t) dt \leq \rho_{i,s}^2 \int_0^{t_f} \omega_i^T(t) \omega_i(t) dt + V_{i,s}(0). \quad (14)$$

式中: $\rho_{i,s}$ 为规定的衰减水平; t_f 为第 i 个 DG 单元的输出时间上限。

备注 1 式 (14) 的物理意义是, 根据李雅普洛夫理论, 每个切换的子系统都是稳定的, 并且从能量的角度 $\omega_i(t)$ 对于输出 $z_i(t)$ 的影响必须在衰减水平 $\rho_{i,s}$ 之下。无论 $\omega_i(t)$ 是多少, 从 $\omega_i(t)$ 到 $z_i(t)$ 的增益必须等于或小于 $\rho_{i,s}^2$ 。在 $\omega_i(t)$ 未知的情况下, 对于规定衰减水平下的 H_∞ 鲁棒设计很有用。

备注 2 本研究的目的是确定本地分散状态反馈控制器式 (12), 确保切换子系统式 (13) 的稳定性。其后, 衰减水平 $\rho_{i,s}^2$ 也将减小到最小值, 使得对任意的 $\omega_i(t)$, H_∞ 性能尽可能减小。

定理 1 切换子系统式 (13) 可以在本地分散控制器式 (12) 的作用下渐进稳定, 但如果要满足当 $\omega_i(t) \neq 0$ 时, 式 (14) 的 H_∞ 控制性能为规定衰减水平 $\rho_{i,s}^2$ 下的值, 则只有当 $P_{i,s} = P_{i,s}^T > 0$, 即满足下面对称矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} P_{i,(s-1)} & (I + A_{i,s})^T P_{i,s} \\ * & P_{i,s} \end{bmatrix} > 0, \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{12}^T & -\rho_{i,s}^2 \end{bmatrix} \leq 0, \quad (16)$$

式 (15) ~ (16) 中:

$$\begin{aligned} \Phi_{11} &= P_{i,s} [A_{i,s} + H_{i,s} F_{i,s}(t)(E_{i,s,1} + E_{i,s,2} k_{i,s})] + \\ &\quad [A_{i,s} + H_{i,s} F_{i,s}(t)(E_{i,s,1} + E_{i,s,2} k_{i,s})]^T P_{i,s} + C_{i,s}^T C_{i,s}; \\ \Phi_{12} &= P_{i,s} (D_{i,s} + H_{i,s} F_{i,s}(t) E_{i,s,3}). \end{aligned}$$

证明

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,s}(t) &= 2x_i^T(t) P_{i,s} [\bar{A}_{i,s} + H_{i,s} F_{i,s}(t)(E_{i,s,1} + E_{i,s,2} k_{i,s})] + \\ &\quad 2x_i^T(t) P_{i,s} (D_{i,s} + H_{i,s} F_{i,s}(t) E_{i,s,3}) \omega_i(t), \end{aligned}$$

易得

$$\begin{aligned} \int_0^{t_f} z_i^T z_i dt &= V_{i,s}(0) - V_{i,s}(t_f) + \int_0^{t_f} [z_i^T z_i + \dot{V}_{i,s}(t)] dt \leq V_{i,s}(0) + \\ &\quad \int_0^{t_f} \left\{ \begin{bmatrix} x_i^T(t) & \omega_i^T(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{12}^T & -\rho_{i,s}^2 \end{bmatrix} \times \right. \\ &\quad \left. \begin{bmatrix} x_i^T(t) & \omega_i^T(t) \end{bmatrix}^T + \rho_{i,s}^2 \omega_i^T(t) \omega_i(t) \right\} dt. \end{aligned}$$

除了在切换点, 如果矩阵不等式 (16) 成立, 系统式 (13) 可在本地控制器式 (12) 下渐进稳定, 并且保证 H_∞ 在规定的 $\rho_{i,s}^2$ 下。

在时间点 t_s , 第 i 个 DG 单元从控制模式 $s-1$ 切换到模式 s , 若式 (14) 满足如下条件, 可确保在切换点的渐近稳定性, 即

$$\begin{aligned} V_i(t_s^+) - V_i(t_s^-) &= x_i(t_s^+)^T P_{i,s} x_i(t_s^+) - x_i(t_s^-)^T P_{i,(s-1)} x_i(t_s^-) = \\ &\quad x_i(t_s^-)^T [(I + A_{i,s})^T P_{i,s} (I + A_{i,s}) - P_{i,(s-1)}] \times \\ &\quad x_i(t_s^-) < 0. \end{aligned}$$

该式等价于式 (15), 证明完毕。

在不等式 (16) 中有一个未知矩阵函数 $F_{i,s}(t)$, 其代表参数不确定问题, 可通过下面的引理得到。

引理 1 矩阵 (或矢量) Y, D 和 E 有合适的大小, 则有

$$Y + DFE + E^T F^T D^T < 0$$

式中: Y 是一个对称矩阵; 对于所有的 F 满足 $F^T F \leq I$ 。当且仅当一组标量 $\varepsilon > 0$ 存在, 得

$$Y + \varepsilon DD^T + \varepsilon^{-1} E^T E < 0.$$

定理 2 当 $\omega_i(t) \neq 0$, 系统 (13) 要通过本地控制器式 (12) 渐进稳定, 且 H_∞ 在规定的 $\rho_{i,s}^2$ ($i \in (1, 2, \dots, N), s \in (0, 1, 2, \dots, M_i)$) 下, 标量值 $\gamma_{i,s} > 0, P_{i,s} = P_{i,s}^T > 0$, 并满足不等式 (17), 即

$$\begin{bmatrix} \Xi_{11} & D_{i,s} & B & P_{i,s}^{-1} C_{i,s}^T \\ * & A & 0 & 0 \\ * & * & -\varepsilon_{i,s,1}^{-1} I & 0 \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} \leq 0, \quad (17)$$

式中: $\Xi_{11} = \bar{A}_{i,s} P_{i,s}^{-1} + P_{i,s}^{-1} \bar{A}_{i,s}^T + (\varepsilon_{i,s,1} + \varepsilon_{i,s,2}) H_{i,s} H_{i,s}^T$, 其中 $H_{i,z}$ 为实常数矩阵;

* 为未知实数;

$$B = \varepsilon_{i,s,1}^{-1} P_{i,s}^{-1} (E_{i,s,1} + E_{i,s,2} k_{i,s})^T;$$

$$A = -\rho_{i,s}^2 + \varepsilon_{i,s,3}^{-1} E_{i,s,3}^T E_{i,s,3}$$

证明不等式 (16) 等价于

$$\begin{bmatrix} \bar{\Xi}_{11} & \bar{\Xi}_{12} \\ * & \bar{\Xi}_{22} \end{bmatrix} \leq 0, \quad (18)$$

式中: $\bar{\Xi}_{11} = P_{i,s} \bar{A}_{i,s} + \bar{A}_{i,s}^T P_{i,s} + C_{i,s}^T C_{i,s} + (\varepsilon_{i,s,1} + \varepsilon_{i,s,2}) P_{i,s} H_{i,s} H_{i,s}^T \times$

$$P_{i,s} + \varepsilon_{i,s,1}^{-1} (E_{i,s,1} + E_{i,s,2} k_{i,s})^T (E_{i,s,1} + E_{i,s,2} k_{i,s});$$

$$\bar{\Xi}_{12} = P_{i,s} D_{i,s}; \quad \bar{\Xi}_{22} = -\rho_{i,s}^2 + \varepsilon_{i,s,2}^{-1} E_{i,s,2}^T E_{i,s,2}.$$

不等式 (18) 是非线性的, 通过 Schur 补, 左乘和右乘矩阵 $\text{diag}\{P_{i,s}^{-1}, I, I, I, I\}$, 因此, 不等式 (18) 等于不等式 (17)。又 $\tilde{k}_{i,s} = k_{i,s} P_{i,s}^{-1}$, $\bar{A}_{i,s} P_{i,s}^{-1} = \bar{A}_{i,s} P_{i,s}^{-1} + B_{i,s} \tilde{k}_{i,s}$, $P_{i,s}^{-1} (E_{i,s,1} + E_{i,s,2} k_{i,s})^T = P_{i,s}^{-1} E_{i,s,1}^T + \tilde{k}_{i,s}^T E_{i,s,2}^T$, 因此, 式 (17) 是线性矩阵不等式。

备注 3 为获得更好的鲁棒性能, H_∞ 按 $\min \rho_{i,s}$ 最小化问题来处理, 这样式 (15) 中的 H_∞ 可以尽可能地减小, 使其满足不等式 (16) 和 (17)。而最小化问题可以转换为线性矩阵不等式最优化问题。通过

Matlab 工具箱中的线性矩阵不等式凸优化技术, 获得最小化 H_∞ , 并可以设计各个切换模型的各种 DG 单元连续分散控制器参数。

4 仿真分析

本文仿真分析了由故障造成 10 kV 系统孤岛状态下的暂态反应^[3-4]。微电网仿真框图如图 2 所示。设计 10 kV 的配电系统通过 35 kV 的辐射线与公共电网相连, 形成一个微电网^[8-9]。公共电网由 35 kV, 1 000 MV 短路电流容量的母线表示。微电网包括 3 个 DG 单元: DG1 是一个 2.0 MVA 含有有激励和调速装置的常规燃气涡轮发电机; DG2 是一个 2.5 MVA 的使用电压源转换器作为接口的单元; DG3 是一个额定容量为 1.5 MVA, 并通过感应电机接口的固定速度的风机装置。线性和非线性负载组合是通过子系统的 3 个径向馈线提供。

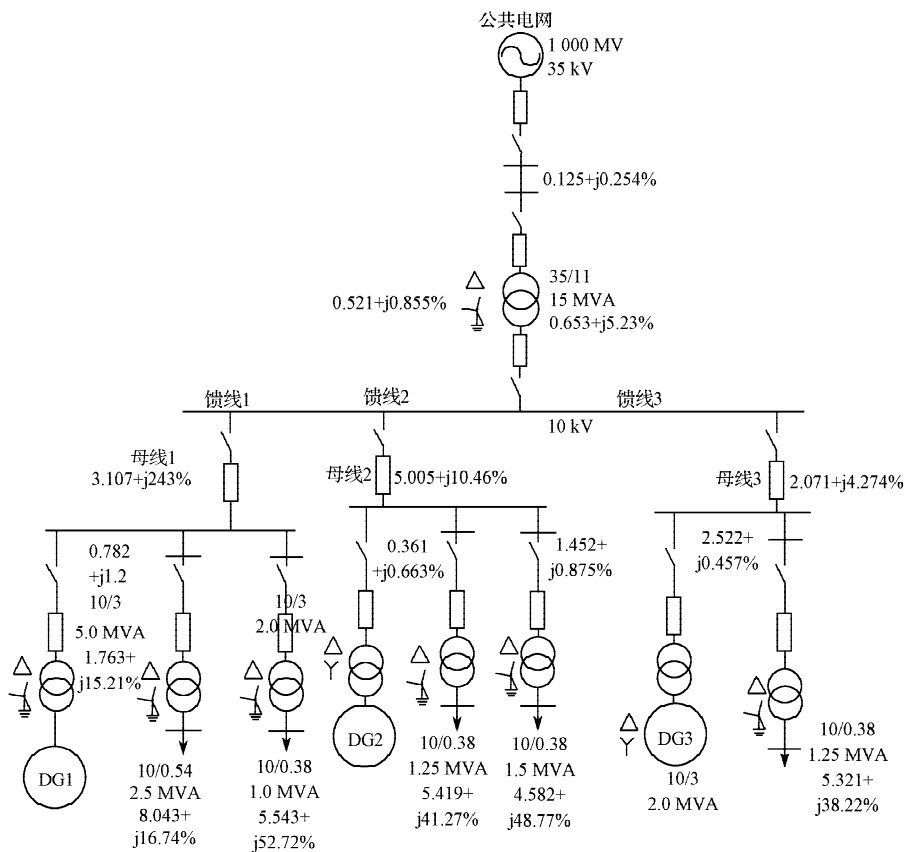


图2 微电网仿真框图

Fig. 2 Microgrid simulation diagram

下面研究由于故障导致孤岛状态时, 微电网的切换暂态反应。假设一个永久的对称三相短路故障发生在 35 kV 线路。对称三相短路故障顺序如下:

阶段 1 $t=0.20$ s 时, 发生故障。

阶段 2 $t=0.26$ s 时, 打开故障线路断路器移除故障, 形成孤岛。

阶段 3 $t=0.32$ s 时, 检测到孤岛现象。

阶段 4 $t=0.5$ s 时, 清除故障后, 重新连接到 35 kV 输电线路。由于故障是永久性的, 重新闭合不成功。

阶段 5 $t=0.7$ s 时, 打开断路器再次移除故障。

通过电压 / 无功功率性能指数, 确定离散监控控制策略来切换 DG2 的无功功率输出达到最大。剩下

的无功功率需求通过电压调节系统由 DG1 和 DG3 提供。图 3 为孤岛状况下系统的暂态反应图。由图可以看出,再次移除故障时,振荡的平缓时间低于 0.5 s,并且母线电压的偏差低于 3%。由于对 DG 单元的控制,最终使得母线电压回到正常范围,并且保持功率角振荡的衰减。这说明由于故障导致微电网进入孤岛运行时,利用混合控制可使系统的暂态稳定性得到提升。

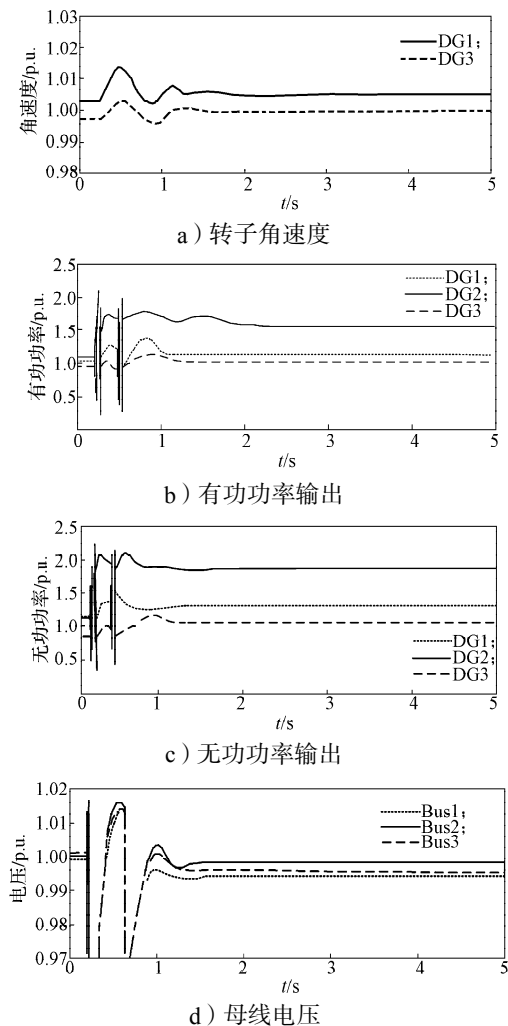


图3 孤岛暂态反应

Fig. 3 Islanding transient response

5 结语

根据混合系统模型,本文设计了一个两层混合控制来提升微电网的暂态性能,即离散监控控制层和连续的本地 H_{∞} 鲁棒控制层。混合控制的主要特征是:离散监控控制层是由所有可用的连续动态监测在线运行组成,根据 D-S 证据理论的信息融合技术来设计,而各种 DG 单元的控制是基于多重李雅普洛夫理论的 H_{∞} 鲁棒控制来设计;而本地连续控制层具有在每个切换模式的区域起辅助调节系统的性

能。通过混合控制的相互作用,孤岛的暂态反应性能可以得到较大提高。最后,仿真分析了包含 3 个 DG 单元的微电网由于故障导致孤岛状态时,其切换暂态反应。仿真结果表明,在孤岛暂态下,微电网的暂态反应性能得到较大提升。本文下一步将研究 $t > 0$ 时微电网的运行状态。

参考文献:

- [1] Lasseter R, Akhil A, Marnay C, et al. Integration of Distributed Energy Resources: The CERTS Microgrid Concept[R]. [S. l.]: Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, 2002: 10-22.
- [2] Kroposki B, Pink C, Deblasio R, et al. Benefits of Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems[J]. Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 901-908.
- [3] Dou Chunxia, Liu Bin. Hierarchical Hybrid Control for Improving Comprehensive Performance in Smart Power System[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2012, 43(1): 595-606.
- [4] Dou Chunxia, Liu Bin. Transient Control for Micro-Grid with Multiple Distributed Generations Based on Hybrid System Theory[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2012, 42(1): 408-417.
- [5] 金鹏. 微电网分层控制与优化运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
Jin Peng. Study on Hierarchical Control and Optimization Operation of Microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [6] Branicky M S, Borkar V S, Mitter S K. A Unified Framework for Hybrid Control: Model and Optimal Control Theory[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, 43(1): 31-45.
- [7] 栗伟周, 李圣清, 徐文祥, 等. 一种实用型电能质量调节装置及其控制[J]. 湖南工业大学学报, 2013, 27(5): 53-57.
Li Weizhou, Li Shengqing, Xu Wenxiang, et al. Design and Control of Practical Power Quality Conditioner[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, 27(5): 53-57.
- [8] 王成山. 微电网分析与仿真实论[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 322-326.
Wang Chengshan. Microgrid Analysis and Simulation Theory [M]. Beijing: Science Press, 2013: 322-326.
- [9] 贾英民. 鲁棒 H_{∞} 控制[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 144-152.
Jia Yingmin. Robust H_{∞} Control[M]. Beijing: Science Press, 2007: 144-152.

(责任编辑: 邓彬)