

一种基于先进变流器的微电网潮流态势感知方法

肖祥香^{1,2}, 段斌^{1,2}, 陈明杰², 彭寒梅¹

(1. 湘潭大学信息工程学院, 湖南 湘潭 411100; 2. 湖南省风电装备与电能变换协同创新中心, 湖南 湘潭 411100)

摘要: 为了实现微电网安全持续供电, 微电网潮流态势感知技术得到关注。随着随机性和间歇性分布式能源的快速发展, 微电网稳定性面临的挑战比过去更加严峻。解决这个问题的关键是如何能在微电网电能质量出现异常情况之前采取行动, 通过对微电网系统的感知、理解、预测以及利导来调节微电网保持稳定状态。提出一种采用先进变流器的微电网潮流态势感知方法。首先对微电网系统进行潮流计算, 获得不同情形下相应的雅克比矩阵。再对引入负荷预测模型的微电网潮流雅克比矩阵进行奇异值分解, 获得系统稳定情况。然后通过先进变流器提前预测选择相应模式保持系统稳定, 以实现微电网态势感知以及最优模式运行, 为保证微电网稳定提供了更多的方法和手段。

关键词: 微电网; 态势感知; 先进变流器; 雅克比矩阵; 奇异值分解

A situation awareness method based on advanced inverter with microgrid power flow algorithm

XIAO Xiangxiang^{1,2}, DUAN Bin^{1,2}, CHEN Mingjie², PENG Hanmei¹

(1. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411100, China; 2. Cooperative Innovation Center of Wind Power Equipment and Energy Conversion, Xiangtan 411100, China)

Abstract: In order to realize the normal and continuous power supply, the awareness of power flow in microgrid region is paid attention. With the rapid development of distributed energy sources, the challenge of microgrid stability is more severe than before. The key to solve this problem is how to take action before the appearance of the abnormal situation and lead to adjust the microgrid to maintain a steady state based on the microgrid system awareness, perception and prediction. This paper proposes a method of microgrid situation awareness using advanced microgrid converter. It takes the microgrid system for power flow calculation, obtaining the corresponding Jacobian matrix under different conditions. Singular value decomposition of microgrid power flow Jacobian matrix of the introduced load forecasting model is made, obtaining the system stability condition. It selects the appropriate operation mode of advanced inverter and maintains system stability by early prediction to achieve microgrid situation awareness and the optimal operation mode, providing more ways and means for microgrid stability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61379063).

Key words: microgrid; situation awareness; advanced inverter; Jacobian matrix; singular value decomposition

0 引言

微电网当中潮流模型的特殊性是由微电网系统有无平衡节点来决定的。对等控制模式下的微电网潮流计算模型中不存在平衡节点, 而无平衡节点的微电网容易导致潮流计算当中的雅克比矩阵奇异^[1-2]。潮流雅克比矩阵实际表征着网络拓扑与运行参数, 雅克比矩阵奇异或者接近奇异对应的微电网

可能是病态的系统, 会导致电能质量的下降以及难以进行微电网的预测和规划^[3]。

目前分布式发电系统大多采用并网变流器作为可再生能源与微电网的接口, 本文提出通过常规的 DG 接口变流器升级为遵循 IEC 6185090-7 标准的先进变流器, 即具有电能质量调节、微电网节点电压和频率以及有功功率预测控制功能的先进变流器, 使得微电网在并网或者孤岛运行过程中接口变流器承担更多职责^[4]。在微电网无平衡节点的初始条件下, 通过先进变流器灵活的可重构的控制策略

可以保证微电网潮流方程对应的雅克比矩阵非奇异, 使得微电网系统可以主动对节点潮流值进行规划以及完成整个系统电能质量的平衡控制^[5]。

文献[6]提出潮流雅可比矩阵及其相应的降阶矩阵的谱条件数与其最小奇异值相关, 因此引入最小奇异值对奇异性分析有重要意义。文献[7]提出潮流方程不收敛的两种原因是病态潮流和潮流无解, 并给出病态潮流的计算方法以及潮流收敛性的调整方法。本文在微电网统一潮流模型的基础上, 先进变流器根据奇异性分析情况灵活地选择控制策略以实现态势感知技术, 力求高效掌握全局潮流值的变化态势并且选取合适的运行方式。文献[8]提出在线预测节点电压的方法, 主要依靠相量测量单元(PMU)实时追踪数据变化趋势, 以最小二乘法准确拟合数据变化走向, 以达到预测, 但是这种方法用到的PMU装置多用于大电网, 具有局限性。文献[9]提出在大型随机矩阵线性特征值统计的指标体系下对未来电网进行态势感知, 需要大量数据, 在一些孤岛微电网系统中并不适用。文献[10]提出建立马尔科夫决策模型以便于进行态势感知与利导过程, 通过先进变流器进行控制, 可以实现微电网的最优模式运行, 然而该文献尚未考虑微电网潮流态势感知的方法以及如何确定微电网的控制策略以指导先进变流器实现模式切换来保持系统稳定。

基于潮流雅可比矩阵奇异值分解法, 本文提出一种微电网态势感知方法, 利用微电网潮流雅可比矩阵奇异值分解方法结合先进变流器控制策略, 以实现微电网的态势感知与预测调节, 保证微电网始终处于非病态的环境下并且能够持续稳定地为负荷供电, 为解决微电网运行规划问题以及保证系统稳定提供更多有效方案。

1 微电网态势感知架构设计

微电网态势感知过程是指在已知的微电网环境下根据一定的技术手段对未来的发展趋势进行感知、理解、预测以及利导, 最后达到微电网系统稳定的目标, 为电能质量的控制以及微电网运行的规划提供技术支持。图1为微电网系统在先进变流器内部对引入统一潮流计算模型和信息交互预测模型获得的雅克比矩阵进行奇异值分解而实现的态势感知技术的架构图。

该系统结构包括分布式电源的微电网、测量装置和先进变流器。本文涉及的测量装置实时通信系统需遵循 IEC61850-7 通信协议, 并且能够持续正常传输信号到控制器以及先进变流器。先进变流器系统是执行态势感知及利导过程的主体结构, 其

中主要包括计算中心、预测中心、模式切换中心等功能单元。

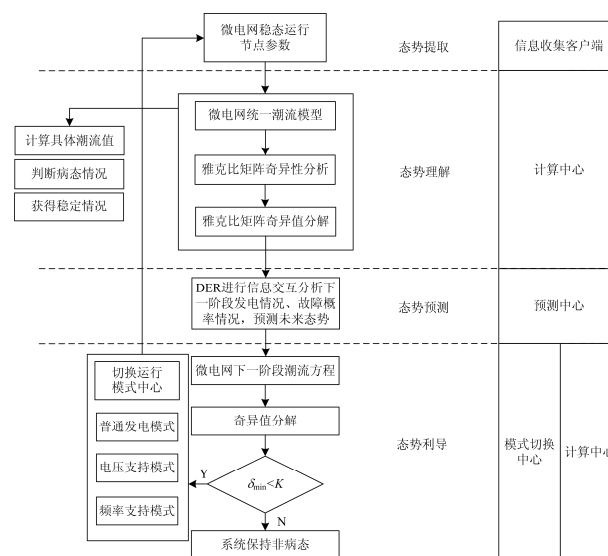


图1 态势感知技术架构图

Fig. 1 Situation awareness technology architecture

微电网环境下的各节点参数可由先进变流器的信息客户端进行采集, 此过程为态势提取; 建立带有参数的初始统一潮流方程 $F(x)=0$, 求解潮流方程得出微电网某节点正常运行时的基准值 x_j , 给出此时的潮流方程并对其雅克比矩阵进行奇异性分析, 获得对应的潮流病态情况以及无解尺度情况, 在空间直角坐标系中, 利用凸锥体模型通过超平面以及独立母线注入向量分析方程可行域的性质, 然后以准确的方程无解尺度 d 来衡量系统的无解程度, 将分析计算结果存放至先进变流器计算中心, 此过程为态势理解; 在先进变流器预测中心, 分析各DG节点出力情况、负荷波动情况以及电力线路的故障概率情况, 做出下一时段微电网潮流态势的预测, 此过程为态势预测; 然后在预测情况的基础上获取下一阶段新的潮流方程 $F_1(x)$, 并对新的方程求解, 再对矩阵进行奇异值分解, 如果矩阵对应的最小奇异值 $\delta_{\min}$ 小于 K , 此时切换先进变流器运行模式, 改变基准值并重复迭代, 直至 $\delta_{\min}$ 大于 K , 此时潮流方程 $F_1(x)$ 将可以进行全局潮流计算; 再通过潮流计算得出下一时间阶段的潮流方程 $F_1(x)$ 的潮流解, 对系统潮流值进行主动调控, 使得系统始终保持非病态, 此过程称之为态势利导。

2 微电网潮流计算分析

2.1 微电网统一潮流模型

微电网可能不存在平衡节点, 有必要统一有平

衡节点的潮流计算和无平衡节点的潮流计算的模型。采取基于节点功率的潮流方程，建立一套统一潮流计算的模型，其应用矩阵形式描述可简写为

$$F_i(x) = 0, x \in R^n \quad (1)$$

式中： x 代表频率 f 、电压幅值 U 、相位 ϕ 的三维向量。

为适用新能源发电的特点，微电网某些 DG 节点采取下垂控制的模式，称其为下垂节点^[2]，又可以称作 PD 节点，其中频率作为不同下垂控制节点信息交互的载体，是未知的系统变量。设微电网有 W 个节点，其中，有 M_1 个 PQ 节点，为 $1, 2, \dots, M_1$ ； M_2 个下垂节点， $M_1+2, \dots, M_1+M_2$ ；其余节点为 PV 节点， $M_1+M_2+1, \dots, W$ 。采用 LMTR 潮流算法解得系统初始状态对应的雅可比矩阵如式(2)所示。

$$J_k = \begin{bmatrix} A'_{M_1 \times (M_1+M_2)} & B_{M_1 \times (N-1)} & E_{M_1 \times 1} \\ A'_{M_2 \times (M_1+M_2)} & B_{M_2 \times (N-1)} & F_{M_2 \times 1} \\ A'_{(N-M_1-M_2) \times (M_1+M_2)} & B_{(N-M_1-M_2) \times (N-1)} & E_{(N-M_1-M_2) \times 1} \\ C'_{M_1 \times (M_1+M_2)} & D_{M_1 \times (N-1)} & G_{M_1 \times 1} \\ C''_{M_2 \times (M_1+M_2)} & D_{M_2 \times (N-1)} & G_{M_2 \times 1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中各分块矩阵如式(3)所示。

$$A'_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial U_j} + \frac{\partial P_{Li}}{\partial U_j}, B_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \phi_j}, C'_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} + \frac{\partial Q_{Li}}{\partial U_j}, D_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \phi_j},$$

$$E_{ij} = \frac{\partial P_{Li}}{\partial f}, F_{ij} = \frac{\partial P_{Li}}{\partial f} + \frac{\partial P_{Gi}}{\partial f}, G_{ij} = \frac{\partial Q_{Li}}{\partial f}, C''_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} + \frac{\partial Q_{Li}}{\partial U_j} + \frac{\partial Q_{Gi}}{\partial U_j} \quad (3)$$

式中： P_i 、 Q_i 分别是节点注入有功功率以及无功功率； P_{Li} 、 P_{Gi} 分别是节点负荷功率以及注入电源功率。

2.2 奇异性分析

在统一潮流模型的基础上，本文归纳出微电网重负荷等不合理运行状态在潮流计算模型当中的两种具体表现形式，包括病态潮流和潮流无解问题。

1) 病态潮流

为进一步判断微电网潮流是否处于病态，微电网潮流方程表述为如式(4)形式。

$$z = F(x) \quad (4)$$

其中 z 向量表示确定的节点注入功率，取式(4)在点 x_0 的全微分，有如式(5)所示。

$$dz = J(x_0)dx + Q(dx) \quad (5)$$

$J(x_0)$ 为微电网潮流方程解点 x_0 处的系统雅可比矩阵，雅可比矩阵的数学性质如式(6)所示。

$$J(x) = \frac{\partial F}{\partial x_0}$$

$$dx = S(x_0)dz \quad (6)$$

$$S(x) = J(x_0)^{-1}$$

其中， $S(x_0)$ 是雅可比矩阵的逆矩阵。

节点注入功率的小扰动以微分量 dz 表示，雅可比矩阵接近奇异时，系统极其微小的扰动会导致系统失稳。实际上，微电网潮流计算在 $J(x)$ 接近奇异时，潮流方程就会表现为不收敛，出现这种情况的原因在于计算当中的扰动始终是存在的。因此在潮流有解的情况下也会导致病态潮流的产生，进而雅可比矩阵接近奇异的状态，系统实际上也是不稳定的。

2) 潮流无解问题

潮流方程是否有解可以用可行域的方法来分析，微电网系统运行点不在可行域之内，显然潮流方程无解，可行域的具体形式可以如图 2 所示。

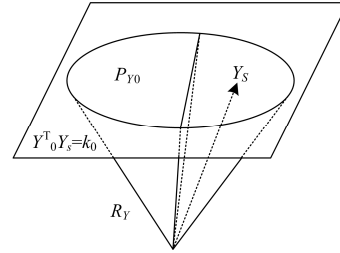


图 2 可行域图示

Fig. 2 Feasible region schema

图中三维可行域凸锥体 R_Y 表示在确定的微电网结构中潮流方程所有实数解的集合，平面 P 球面与向量 Y 满足相应的数学关系。图中可行域边界实际也对应着雅可比矩阵奇异的情况。

设定无解尺度 d 为不可行域内微电网运行点 S 到可行域内距离最近的点 S^m 的距离，以衡量无解程度的尺度，则有

$$d = \sqrt{(S_m - S)^T (S_m - S)} \quad (7)$$

进行雅可比矩阵奇异性分析是判断系统是否处于不合理运行状态的关键，因而计算相应奇异值以及无解尺度是必要的步骤。

2.3 奇异值分解

研究雅可比矩阵接近奇异的程度可以利用最小奇异值的大小来确定。设雅可比矩阵 $J \in R^{m \times n}$ ，有单位矩阵 U 和 V ，满足

$$V^T J U = \begin{bmatrix} \wedge & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $\Lambda = \text{diag}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_r)$, 其中 $\delta_{\min}$ 为雅克比矩阵的最小奇异值。称矩阵 U 各个列向量为 J 的右奇异向量, 矩阵 V 各个列向量为 J 的左奇异向量^[12]。

最小奇异值 $\delta_{\min}$ 对应着距离电压越限的距离, 设定值 $K(K>0)$ 满足: $\delta_{\min}>K$ 时, 根据预测值建立的潮流方程雅克比矩阵一定是非奇异状态, 微电网对应的稳定性状态较好; $\delta_{\min}<K$ 时, 根据预测值建立的潮流方程雅克比矩阵可能处于奇异状态, 微电网对应的稳定性状态较差。

在初始状态无平衡节点的微电网系统中, 先进变流器控制器内部程序会设定平衡节点。设定有平衡节点的微电网对应的是全节点雅克比矩阵, 对此时的雅克比矩阵 J 进行奇异值分解。

$$J = V \Sigma U^T = \sum_{i=1}^{2n-m} V_i \delta_i^{-1} U_i V_i^T \quad (9)$$

在奇异值分解过程中, 选取估计值 q , 对 $[J^T J - qI]$ 矩阵进行三角分解获取下三角矩阵 L , 设定 $LY^{(k)} = Z^{(k)}$, 取初值 $Z^{(0)} = [1, 1, \dots, 1]^T$, 则有

$$\begin{aligned} DL^T W^{(k+1)} &= Y^K \\ Z^{(k+1)} W^{(k+1)} / \max(W^{k+1}) \\ |\max(W^{k+1}) - \max(W^k)| &< \varsigma \end{aligned} \quad (10)$$

反复迭代, 直至迭代完成, 求解获得微电网相关的稳定性判据。

$$\begin{aligned} \delta_{\min} &= \sqrt{q + \frac{1}{\max(W^*)}} \\ U_{\min} &= Z^* \\ V_{\min} &= \frac{JU_{\min}}{\delta_{\min}} \end{aligned} \quad (11)$$

进一步, 在雅克比矩阵非奇异的前提下, 可用 LC_j 表示节点电压强弱程度, LC_j 的表达式如下:

$$LC_j = \frac{U_j}{\delta_{\min}}, j \in \{1, 2, \dots, n-m\} \quad (12)$$

3 先进变流器控制策略

3.1 IEC61850 逻辑节点

根据 IEC61850-90-7 标准的定义, 先进变流器内具体的模式切换过程需要两个相关的逻辑节点, 分别是逻辑节点 FNMA 和 DGSM。FNMA 的节点信息如表 1 所示。

DGSM 的节点信息如表 2 所示。

在逻辑节点 FNMA 和 DGSM 功能实现的背景下, 与常规变流器不同的是, 先进变流器决策自动化的程度更高, 控制方式的可重构性也更高。

表 1 FNMA 节点信息

数据对象名	注释	M/C/O
PairArray	自变量与因变量定义	M
IndpUnits	定义自变量参数	M
DeptRef	定义因变量参数基准	M
DeptRefStr	开始限制发出与吸收功率时刻(此时已偏离标准值)	M
DeptRefStop	刚刚开始发出或吸收功率时刻(此时已偏离标准值)	M

表 2 DGSM 节点信息

数据对象名	注释	M/C/O
LNNName	逻辑节点名称	
InCurve	参考某一条曲线 (曲线已经在FMAR 中得到定义)	M
ModTyp	运行模式的参数类型 2-无功支持模式 3-有功支持模式 6-保持运行模式	M

3.2 先进变流器物理层结构

在系统感知到无平衡节点的初始情况下, 分布式电源可以依赖先进变流器系统之间的信息交互来完成系统控制方式的重构。初始状态选定潮流计算获得的频率值符合要求的 DG 节点为主控节点, 微电网能够保持主从控制模式。在调控过程中, 主控节点的选定是灵活的, 先进变流器会根据系统预测情况重构出新的控制模式。微电网主从控制模式下的频率恒定, 各节点电压依靠先进变流器主动调节来实现稳定。先进变流器的物理层结构如图 3 所示。

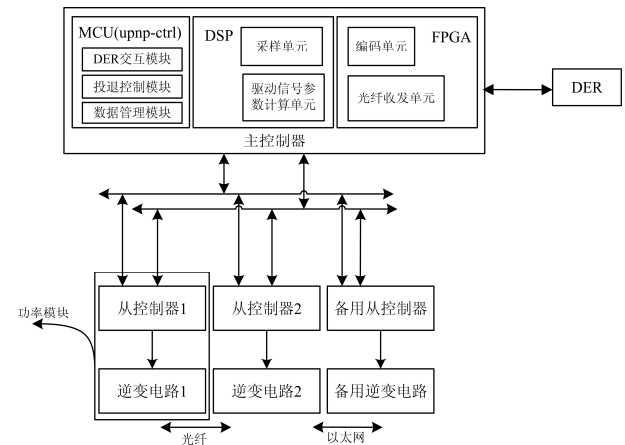


图 3 先进变流器系统结构

Fig. 3 Advanced inverter system architecture

先进变流器系统包括主从控制器、逆变电路等硬件系统。主控制器的控制模式是基于 UPnP 协议实现的。微控制单元(MCU)内部的 DER 交互模块、退役控制模块、数据管理模块共同完成上层的控制功能; DSP 单元实现数据采样、参数计算等功能; FPGA 单元完成编码、光纤收发等功能。先进变流器的主控制器与外界 DER 进行信息交互,获取其他 DER 的发电规划、负荷的需求规律以及线路故障概率情况,从而可以预测下一阶段的潮流分布情况。

3.3 电压恢复策略

装设有可重构先进变流器的微电网系统的稳定取决于电压的稳定。先进变流器预测获得初始值不同的新潮流方程,对其进行雅克比矩阵分解获取电压强弱情况。

在雅克比矩阵非奇异的状态下,根据节点电压强弱排序,电压最弱的 DG 节点重构为主控节点。具体的切换模式信息交互图如图 4 所示,客户端的信息包括潮流计算初始值、经验值确定的定值信息和 DER 信息交互收集的信息传入先进变流器控制器内部进行计算以及预测,若判断出预测值不在最优分布范围内,系统进入模式切换状态,根据决策系统的结果选择相应的逆变电路并且生成日志。根据 IEC61850-90-7 标准定义,先进变流器有电压无功模式、频率有功模式、发电模式可供选择。在重构后的主从控制策略下,微电网的稳定需要先进变流器的多次调节,根据电压或者频率的偏差水平确定优先调节级数,再根据优先级数不断改变变流器模式使得系统所有节点的电压都趋于稳定。

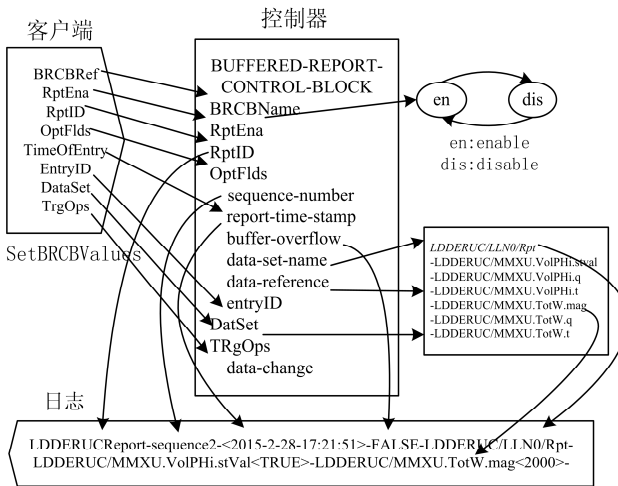


图 4 模式切换信息交互图

Fig. 4 Switching information interaction diagram

4 仿真算例

本文选用的 5 节点微电网系统如图 5 所示,在

Matlab 实验平台建模,用以模拟先进变流器管理系统采用一系列态势感知手段来应对负荷波动、DER 出力变化、线路故障所带来的微电网的稳定性问题。具体地,以节点潮流的预测值和雅克比矩阵的最小奇异值为外部环境信息,在系统内部用先进变流器进行潮流预测调节,以现实微电网电压的稳定。

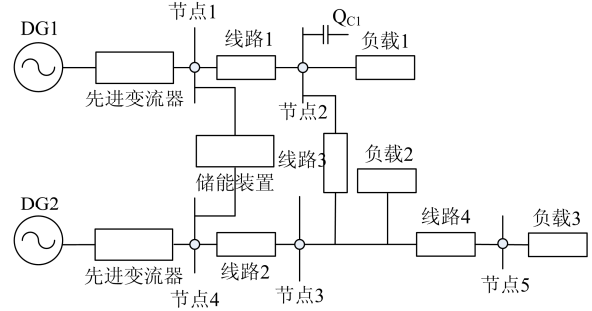


图 5 微电网系统示意图

Fig. 5 Microgrid system

4.1 微电网潮流算例分析

该改造后的微电网模型包括分布式电源、先进变流器及控制器、负荷、电力线路,其中电力线路采用 π 型等值模型。初始状态节点类型有 PQ、PV、PD,在可重构变流器控制策略下系统还会重新确定平衡节点。

微电网系统网络参数可用矩阵 L_1 和 L_2 表示, L_1 矩阵每列依次是支路首端、末端、支路阻抗、对地电纳、支路变比、折算标志侧(高压侧为 1,低压侧为 0)。 L_2 矩阵每列依次是节点的功率注入情况、节点电压初值、PV 节点电压 V 给定值;节点无功补偿设备容量、节点分类标号(平衡节点为 1; PQ 节点为 2; PV 节点为 3; PD 节点为 4)。在微电网系统中,利用微电网潮流计算方法分析计算选定平衡节点,并根据微电网的预测值可知下一时段的参数矩阵如下:

$$L_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0.04 + 0.20i & 0.50i & 1 & 0 \\ 2 & 3 & 0.10 + 0.16i & 0.70i & 1 & 0 \\ 2 & 5 & 0.20 + 0.36i & 0.80i & 1 & 0 \\ 3 & 4 & 0.06 + 0.21i & 0.52i & 1 & 0 \\ 3 & 5 & 0.03i & 0.10i & 1 & 0 \end{bmatrix}, L_2 = \begin{bmatrix} -1.60 - 0.80i & 1 & 0 & 1 \\ -2.00 - 1.00i & 1 & 0 & 2 \\ -3.70 - 1.30i & 1 & 0 & 3 \\ 5.00 & 1 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & 0 & 3 \end{bmatrix}$$

通过微电网潮流计算分析,下一时段对应的潮流方程有解,并且求出全节点雅克比矩阵如下:

$$J = \begin{bmatrix} -4.0456 & -2.7711 & 2.5312 & 3.7251 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4.0353 & -0.3617 & -3.7251 & 2.5312 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4.2960 & 3.4269 & -8.4583 & -8.5940 & 3.0351 & 5.1066 & 0 & 0 & 0 \\ -3.4269 & 4.2960 & 10.9486 & -5.2372 & -5.1066 & 3.0351 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5.6485 & 5.7572 & -54.5178 & -16.9947 & 6.0652 & 3.4296 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7126 & -2.9590 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 12.5409 & 14.2239 & -1.3401 & -8.4800 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.4691 & -6.9740 & 0 \end{bmatrix}$$

调用 Matlab 里面的 SVD 函数, 采用奇异值分解法对雅克比矩阵进行分解, 获得最小奇异值 $\delta_{\min}=0.082\ 6$, 设定值 $K=1.000\ 0$, 最小奇异值小于 K , 此时系统雅可比矩阵极易奇异, 如果不提前调控, 微电网系统下一时段将处于不合理运行状态。

因为本算例中最小奇异值不为零, 因而需要判断节点电压强度 LC_j , 微电网内各节点电压强度指标如表 3 所示。

表 3 电压强度指标排序

Table 3 Control results of advanced inverters

j	4	3	2	5	1
LC_j	50.140 4	18.423 7	13.566 6	12.106 5	11.116 2

分析表 3 可知, 电压强度最小的 DG 节点是节点 1, 选定节点 1 为主控 DG 节点, 从而对节点 1 处的先进变流器进行预测调节。

4.2 变流器态势感知方法仿真

在节点 1 处首先选择先进变流器电压支持模式, 以产生无功功率提高电压薄弱节点电压。在预测中心, 以不同方向模拟负荷波动方向获取预测值, 优先程序计算中心以预测值为依据建立频率优先调节级数 R_f 和电压优先调节级数 R_u 比较系统, 确定优先级后, 先后切换相应运行模式以实现最优化状态运行。在 Matlab 软件中建立变流器支持系统的模型, 多次判断最小奇异值是否满足稳定性要求, 最后求解变流器的支持模式以及切换过程。节点 1 的调控过程在 Matlab 中求解结果如表 4 所示, 表中 $\delta_{\min}$ 为模式切换后获得的雅克比矩阵的最小奇异值。

表 4 先进变流器调控结果

Table 4 Control results of advanced inverters

调控过程	先进变流器功能					
	电压支持模式	R_u	频率支持模式	R_f	发电模式	$\delta_{\min}$
1	开	1.058 6	关	0.362 7	关	0.501 6
2	关	0.986 1	开	0.562 8	关	0.742 7
3	关	0.126 8	关	0.102 5	开	0.816 2
4	关	0.058 3	关	0.037 2	开	0.975 4
5	关	0.015 3	关	0.015 7	关	1.148 1

本文通过先进变流器的 5 次调控, 系统获得 $\delta_{\min}=1.148\ 1$, 满足稳定性要求。

5 结论

微电网系统无平衡节点的情况日益普遍, 使得传统的电力运行规划方案不再适用于微电网, 结合

微电网先进变流器可重构的控制策略以及潮流雅克比矩阵奇异值分解法来判断系统的稳定程度, 本文提出了微电网潮流态势感知与先进变流器的模式切换信息交互模型, 建立了具体的态势感知以及利导模型, 以保证微电网运行的可靠性和安全性。但本文未重点分析先进变流器相关逆变电路的具体结构, 需要进一步考虑。

参考文献

- [1] 丁明, 刘新宇, 解蛟龙, 等. 考虑微网综合性能的并网型微网优化配置模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 1-8.
DING Ming, LIU Xinyu, XIE Jiaolong, et al. Optimal planning model of grid-connected microgrid considering comprehensive performance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 1-8.
- [2] 彭寒梅, 曹一家, 黄小庆, 等. 无平衡节点孤岛运行微电网的连续潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 6-10.
PENG Hanmei, CAO Yijia, HUANG Xiaoqing, et al. Continuation power flow calculation of microgrid without balance node[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 6-10.
- [3] NETO A B, ALVES D A. Singularities analysis of the Jacobian matrix modified in the continuation power flow: performance evaluation[J]. IEEE Latin America Transactions, 2017, 15(11): 2137-2143.
- [4] 易映萍, 罗海, 胡四全. 小功率光伏并网逆变器控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 64-68.
YI Yingping, LUO Hai, HU Siquan. Study on control scheme based on low-power photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 64-68.
- [5] 金卓勃, 向铁元, 陈红坤, 等. 考虑电能质量问题的分布式光伏发电接入规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 1-8.
JIN Zhuoqing, XIANG Tieyuan, CHEN Hongkun, et al. Planning method of distributed photovoltaic power generation considering power quality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 1-8.
- [6] 徐志友, 纪延超, 钮文艳, 等. 衡量潮流雅可比矩阵及其降阶阵不对称性和奇异性的指标[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 51-57.
XU Zhiyou, JI Xianchao, NIU Wenyan, et al. Indices for evaluating the unsymmetry and singularity of load flow Jacobian matrix and its reduced ones[J]. Proceedings of

- the CSEE, 2006, 26(5): 51-57.
- [7] 李敏, 陈金富, 段献忠, 等. 潮流计算收敛性问题研究综述[J]. 继电器, 2006, 34(4): 74-79.
LI Min, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong, et al. A study of load flow calculation when power flow does not converge to a solution[J]. Relay, 2006, 34(4): 74-79.
- [8] 段俊东, 孙彦楷, 尹秀刚. 广域测量系统用于电压稳定在线预测[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1748-1752.
DUAN Jundong, SUN Yankai, YIN Xiugang. Voltage stability's online prediction using WAMS[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1748-1752.
- [9] HE Xing, QIU Caining, AI Qian, et al. Designing for situation awareness of future power grids: an indicator system based on linear eigenvalue statistics of large random matrices[J]. IEEE Access, 2016, 4: 3557-3568.
- [10] 段斌, 陈明杰, 李辉, 等. 基于电能质量态势感知的分布式发电主动运行决策方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 176-181.
DUAN Bin, CHEN Mingjie, LI Hui, et al. Decision method of proactive operation for distributed generation based on power quality situation awareness[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 176-181.
- [11] CHEN Wu, DUAN Bin, LI Hui, et al. Reconfigurable inverter: an approach to self-healing of distributed generation[C] // 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA), November 3-6, 2015, Bangkok, Thailand: 1-5.
- [12] IQBAL T, BANADAKI A D, FELIACHI A. Optimal voltage control using singular value decomposition of fast decoupled load flow Jacobian[C] // 2017 North American Power Symposium (NAPS), September 17-19, 2017, Morgantown, USA: 1-6.
- [13] 杨胜春, 汤必强, 姚建国, 等. 基于态势感知的电网自动智能调度架构及关键技术[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 33-39.
YANG Shengchun, TANG Biqiang, YAO Jianguo, et al. Architecture and key technologies for situational awareness based automatic intelligent dispatching of power grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 33-39.
- [14] 黄伟, 刘琦, 杨舒文, 等. 基于主动配电系统供电能力的安全态势感知方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 74-80.
HUANG Wei, LIU Qi, YANG Shuwen, et al. Security situation awareness based on power-supply ability model of active distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 74-80.
- [15] 史智萍, 王智敏, 吴玮坪, 等. 基于态势感知的电网消纳可再生能源发电评估与扩展规划方法[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2180-2186.
SHI Zhiping, WANG Zhimin, WU Weiping, et al. Evaluation of renewable energy integration capability and network expansion planning based on situation awareness theory[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2180-2186.
- [16] 许鹏, 孙毅, 石墨, 等. 负荷态势感知: 概念、架构及关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2918-2926.
XU Peng, SUN Yi, SHI Mo, et al. Load situation awareness: concept, framework, and key technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2918-2926.

收稿日期: 2017-10-11; 修回日期: 2017-12-15

作者简介:

肖祥香(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: xiaoxiangxiang_xtu@163.com

段斌(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: duanbin@xtu.edu.cn

(编辑 张爱琴)