

分布式光伏与风电机组LVRT及电流限幅环节的等值建模

陈海东¹, 潘学萍¹, 黄桦², 孙晓荣¹, 和大壮¹, 雍成立¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要:随着分布式新能源机组的持续并网, 电力负荷的动态特性已发生显著变化, 需要研究主动配电网等值建模新方法。主动配电网中分布式新能源机组类型呈现多样化, 控制器存在切换以及限幅等非线性环节。对此, 针对双馈风电机组、直驱永磁风电机组和光伏电源模型结构的共性, 构建了可描述多类型分布式新能源机组动态特性的通用模型。在此基础上提出了多激励影响下分布式新能源机组低电压有功管理、低电压无功管理以及电流限幅等非线性环节的非机理等值建模新方法, 并基于简单算例进行了验证。对某实际主动配电网进行建模仿真, 结果表明: 将所提等值模型与传统负荷模型并联, 可较为准确地描述计及分布式新能源机组低电压穿越(LVRT)和电流限幅环节的主动配电网的动态特性。

关键词:分布式新能源机组; 动态特性; 主动配电网; 非线性环节; 低电压穿越; 等值建模

中图分类号: TM 712

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202205063

0 引言

当前随着分布式新能源机组的持续并网, 电力负荷的动态特性已发生了显著变化, 传统负荷模型不再适用于新型电力系统仿真分析的需求, 亟需构建含分布式新能源机组的综合负荷模型^[1-2]。目前在研究主动配电网的等值模型时, 一般将配电网中各类分布式新能源机组等值, 将其与传统负荷模型并联作为主动配电网的等值模型结构^[3-6]。然而由于主动配电网中分布式新能源机组类型不同、控制方式各异, 且需满足主动配电网的动态无功支撑需求, 接入主动配电网的分布式新能源机组通常被要求具备低电压穿越(LVRT)能力^[7-8]。故建立含LVRT控制的多类型分布式新能源机组的通用模型为当前的研究热点。

由电力电子设备主导的分布式新能源机组, 其控制器存在限幅、死区等环节; 且正常情况下的PQ解耦控制与LVRT控制之间存在切换等离散事件; 文献[9]还指出双馈风电机组(DFIG)为混杂动态系统, 具备非线性特征。故含多类型分布式新能源机组等值建模的难点在于对非线性环节进行等值建模。

目前针对诸如换流器等非线性系统的等值建模研究较少。文献[10]从逆变器为典型非线性仿射系统的角度出发, 研究了逆变器降阶与微分流形的相似性关系, 将微分同调应用于逆变器降阶中, 提出了单变量微分同调判据。文献[11]针对含多状态变量

的并网逆变器, 提出了基于广义哈密顿作用量的同调判别标准, 并依据能量守恒得到了实用化同调判据。在模型等值方面, 文献[12]通过对每台换流器下垂控制中的状态变量进行等效变换, 提出了计及多换流器动态交互作用的等值单机非线性模型, 但在等值建模时仅对多台换流器的控制环节进行了等效变换, 未涉及非线性环节的等值。文献[13-14]通过解析方法, 对风电场/光伏(PV)场站内机组的LVRT动态全过程进行了解析等值, 进一步将解析等值结果与其他环节的物理模型相结合, 获得等值机的模型及参数。然而上述文献仅对LVRT过程进行了等值处理, 对于如限幅环节等非线性环节的等值未见研究。还有研究采用参数辨识方法获得非线性模型参数, 如文献[15-16]基于模型参考自适应方法/扩展卡尔曼滤波法, 对永磁同步发电机转子电阻等电气参数进行了辨识。然而文献[17]指出, 非线性系统在离散切换瞬间, 微小的参数变化可能导致较大动态差异, 基于此刻响应数据进行参数辨识将产生较大的误差, 即无法通过参数辨识获取准确的非线性模型参数。

针对上述问题, 本文分析了分布式新能源机组受多激励影响的非线性环节响应特性, 采用非机理建模方法获得非线性环节的等值模型。以主动配电网为例, 建立多类型分布式新能源机组的通用模型。模型等值时将线性环节采用参数辨识的方法获取模型重点参数; 非线性环节采用解析方法推导其在不同扰动程度下的解析结果, 进一步采用拟合法获得非机理等值模型。最后对某实际配电网进行建模仿真, 验证了所提方法的可行性。值得注意的是, 本文基于PSCAD/EMTDC平台推荐的分布式新能源机组模型及参数进行分析研究, 但所提方法同样适用于不同新能源厂商提供的机组模型及参数。

收稿日期: 2022-04-08; 修回日期: 2022-05-15

在线出版日期: 2022-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077061, 51837004)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077061, 51837004)

1 多类型分布式新能源机组的通用模型及LVRT控制

1.1 多类型分布式新能源机组的通用模型结构

DFIG、直驱永磁风电机组(DDPMSG)和PV的详细模型^[18-19]见附录A图A1。由于电网侧扰动下分布式新能源机组的动态特性受换流器及其控制环节影响,且各类分布式新能源机组的控制策略相近,为此文献[3]提出了构建逆变型并网的多类型分布式新能源机组的通用模型,但其构建的模型未计及分布式新能源机组LVRT的动态特性。

本文提出的可表达多类型分布式新能源机组LVRT动态特性的通用模型如附录A图A2所示。由于DFIG、DDPMSG以及PV的主要区别在于原动机侧,因此图A2所示通用模型中将原动机侧等效为恒功率源,其有功、无功功率参考值分别为 P_{gref} 、 Q_{gref} ;经直流电容、逆变器、RLC滤波电路后通过输电线路(电阻为 R_L 和电抗为 X_L)并网。锁相环(PLL)用以获得机端电压相位;有功功率和无功功率均采用双环控制方式。下面对计及分布式新能源机组LVRT动态过程的低电压有功、无功管理环节和电流限幅环节进行详细介绍。

1.2 低电压有功管理环节

低电压有功管理环节根据分布式新能源机组的端口电压对 P_{gref} 进行调整,调整后的有功功率参考值为 λP_{gref} (λ 为分布式新能源机组的有功调整系数)。不同新能源厂商关于 λ 的设置方法不尽相同,本文选用PSCAD/EMTDC平台中分布式新能源机组的有功调整系数 λ 进行分析,其波形如图1所示。图中: U 为分布式新能源机组的端口电压; U_n 为系统额定电压。

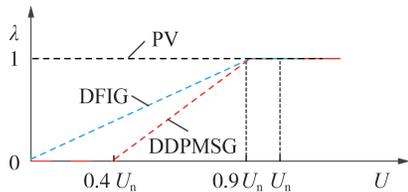


图1 分布式新能源机组的有功调整系数

Fig.1 Active power adjustment coefficient of distributed new energy units

1)DFIG的 λ 为:

$$\lambda = \begin{cases} k_p U & 0 \leq U \leq 0.9U_n \\ 1 & U > 0.9U_n \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_p 为有功系数。

2)DDPMSG的 λ 为:

$$\lambda = \begin{cases} 0 & 0 \leq U \leq 0.4U_n \\ k_p U & 0.4U_n < U \leq 0.9U_n \\ 1 & U > 0.9U_n \end{cases} \quad (2)$$

3)PV的 $\lambda=1$ 。

电压跌落期间,分布式新能源机组的有功功率与其端口电压跌落深度相关;故障清除后分布式新能源机组的端口电压开始恢复,由图1可知其有功功率也开始恢复,功率恢复速率与电压恢复速率一致。

1.3 低电压无功管理环节

低电压无功管理环节的确定分布式新能源机组在LVRT期间的无功附加电流 i_{qLVRT} 。与换流器稳态控制下的无功电流指令值之和作为分布式新能源机组的总无功电流参考值 i_{qref} 。选用PSCAD/EMTDC平台中分布式新能源机组的无功附加电流模块进行分析。

1)DFIG未设置无功附加电流模块,即 $i_{qLVRT}=0$ 。

2)DDPMSG的 i_{qLVRT} 为:

$$i_{qLVRT} = k_q (U_n - U) \quad 0 \leq U \leq 0.9U_n \quad (3)$$

式中: k_q 为无功附加电流系数。

3)PV的 i_{qLVRT} 为:

$$i_{qLVRT} = \begin{cases} 0 & U > 0.8U_n \\ k_q (U_n - U) - 0.25 & U \leq 0.8U_n \end{cases} \quad (4)$$

电压跌落期间,分布式新能源机组的无功功率与其端口电压的跌落深度相关;故障清除后分布式新能源机组的端口电压开始恢复,其无功功率也开始恢复,功率恢复速率与电压恢复速率一致。

1.4 电流限幅环节

分布式新能源机组受电力电子换流器最大电流限额 I_{max} 的影响。为保证电压跌落期间对系统的无功功率支撑,分布式新能源机组常采用无功优先控制策略,此时其最大有功电流 $i_{d\text{max}}$ 和最大无功电流 $i_{q\text{max}}$ 满足:

$$\begin{cases} i_d \leq i_{d\text{max}} = \sqrt{I_{\text{max}}^2 - i_q^2} \\ i_q \leq i_{q\text{max}} = I_{\text{max}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: i_d 和 i_q 分别为分布式新能源机组端口电流的 d 轴和 q 轴分量。在附录A图A2所示的通用模型中,电力电子换流器的低电压有功、无功管理环节及电流限幅环节都为非线性环节,其余为线性环节。

2 多类型分布式新能源机组非线性环节的等值建模

针对含多类型分布式新能源机组的主动配电网,建模时分布式新能源机组通常采用动态等值方法,即将配电网中多类型分布式新能源机组等值为1台或多台等值机组。根据图A2所示通用模型进行等值建模,线性环节中采用按容量加权平均或参数辨识等方法获取等值模型参数,而目前对于非线性环节的等值建模方法较少。本文提出受多激励影响

的非线性环节等值建模方法。

2.1 低电压有功管理环节的模型聚合

由于主动配电网中各类型分布式新能源机组的并网点不同,电网侧扰动下其低电压有功管理环节的状态也不尽相同,等值建模时需计及各类型分布式新能源机组不同低电压有功管理环节状态的影响。

假设主动配电网中被等值的分布式新能源机组有 n 台,根据图 1 可得等值机的有功功率参考值 $P_{\text{eq.ref}}$ 为:

$$P_{\text{eq.ref}} = \sum_{j=1}^n \lambda_j P_{\text{gref}j} = \lambda_{\text{eq}} \sum_{j=1}^n P_{\text{gref}j} \quad (6)$$

式中: λ_{eq} 为等值机的有功调整系数; λ_j 为分布式新能源机组 j 的有功调整系数; $P_{\text{gref}j}$ 为分布式新能源机组 j 的有功参考值。由式(6)可以看出, λ_{eq} 与各分布式新能源机组是否进入低电压有功管理环节有关。当所有被等值机组都未进入低电压有功管理环节时,各机组的 λ 皆为 1,故 $\lambda_{\text{eq}} = 1$; 当部分/全部机组进入低电压有功管理环节时,需根据式(6)求取 λ_{eq} 。

以 2 台分布式新能源机组为例,假设扰动 1 下机组 1 进入低电压有功管理环节,其有功参考值为 $\lambda_{1,1} P_{\text{gref}1}$, 机组 2 未进入低电压有功管理环节,其有功参考值为 $\lambda_{2,1} P_{\text{gref}2}$, 则等值机的有功调整系数为 $\lambda_{\text{eq},1} = \frac{\sum_{j=1}^2 \lambda_{j,1} P_{\text{gref}j}}{\sum_{j=1}^2 P_{\text{gref}j}}$ 。随着电压跌落程度的加深,当 2 台机组都进入低电压有功管理环节时,机组 1 的有功参考值为 $\lambda_{1,2} P_{\text{gref}1}$, 机组 2 的有功参考值为 $\lambda_{2,2} P_{\text{gref}2}$, 则等值有功调整系数为 $\lambda_{\text{eq},2} = \frac{\sum_{j=1}^2 \lambda_{j,2} P_{\text{gref}j}}{\sum_{j=1}^2 P_{\text{gref}j}}$, 此后随着电压跌落程度的进一步

增加,等值有功调整系数为 $\lambda_{\text{eq},\tau} = \frac{\sum_{j=1}^2 \lambda_{j,\tau} P_{\text{gref}j}}{\sum_{j=1}^2 P_{\text{gref}j}}$

(下标 τ 代表不同的扰动)。根据上述结果可得低电压有功管理环节的模型聚合如图 2 所示。图中: $\Delta U_{\text{eq}} = U_n - U_{\text{eq}}$, U_{eq} 为等值母线电压; $\Delta U_{\text{eq},0}$ 为所有分布式新能源机组都未进入低电压有功管理环节时等

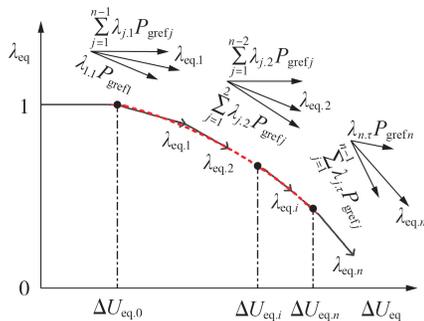


图 2 低电压有功管理环节的模型聚合
Fig.2 Model aggregation of low voltage active power management link

值母线电压变化量的门槛值; $\Delta U_{\text{eq},n}$ 为所有分布式新能源机组都进入低电压有功管理时等值母线电压变化量的门槛值。由图可知 λ_{eq} 为斜率单调递减的连续折线。

根据图 2, 当配电网中有 n 台被等值机组时, λ_{eq} 可采用式(7)所示分段函数近似拟合。

$$\lambda_{\text{eq}} = \begin{cases} 1 & \Delta U_{\text{eq}} < \Delta U_{\text{eq},0} \\ a_p \Delta U_{\text{eq}}^2 + b_p \Delta U_{\text{eq}} + c_p & \Delta U_{\text{eq},0} \leq \Delta U_{\text{eq}} \leq \Delta U_{\text{eq},n} \\ a_{p1} \Delta U_{\text{eq}} + c_{p1} & \Delta U_{\text{eq}} > \Delta U_{\text{eq},n} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $a_p, b_p, c_p, a_{p1}, c_{p1}$ 为拟合系数。

当等值母线电压的变化量处于 $[\Delta U_{\text{eq},0}, \Delta U_{\text{eq},n}]$ 区间时,从图 2 可以看出,可采用拟合系数为 a_p, b_p, c_p 的二次函数(图中的虚线)拟合等值机的有功调整系数;当所有分布式新能源机组都进入低电压有功管理环节时, λ_{eq} 为关于 ΔU_{eq} 的一次函数,此时拟合系数 a_{p1} 和 c_{p1} 均为常数。

值得注意的是,若分布式新能源机组在进入低电压有功管理环节后,有功调整系数具有分段特性,如图 1 所示的 DDPMSG,在端口电压跌落到 $0.4U_n$ 及以下时,有功调整系数恒定为 0。则 λ_{eq} 在式(7)所示一次函数对应的等值母线电压变化区间会多出 1 个二次函数和一次函数。这是因为存在一部分 DDPMSG 的有功调整系数为 0,一部分不为 0 的情况。此时多出的分段函数在形式和确定方法方面与式(7)相同,这里不再赘述。

2.2 低电压无功管理环节的模型聚合

设有 n 台分布式新能源机组被等值,则由式(3)、(4)可得等值机的无功附加电流为:

$$i_{q\text{LVRT,eq}} = \sum_{j=1}^n i_{q\text{LVRT}j} = k_{q,\text{eq}} \Delta U_{\text{eq}} \quad (8)$$

式中: $i_{q\text{LVRT,eq}}$ 为等值机无功附加电流值; $k_{q,\text{eq}}$ 为等值机无功附加电流系数。由式(3)、(4)可以看出:当所有分布式新能源机组都未进入低电压无功管理环节时,各机组的 k_{qj} 皆为 0,因此 $k_{q,\text{eq}} = 0$; 当部分/全部机组进入低电压无功管理环节时,需根据式(8)求取 $k_{q,\text{eq}}$ 。

以 2 台分布式新能源机组为例,假设扰动 1 下机组 1 进入低电压无功管理环节,其无功附加电流 $i_{q\text{LVRT}1} = k_{q1} \Delta U_1 + \varepsilon_1$, ΔU_1 为机组 1 端口电压的变化量, ε_1 为常数, k_{q1} 为机组 1 的无功附加电流系数; 机组 2 未进入低电压无功管理环节,其无功附加电流为 0,此时等值机的无功附加电流为 $i_{q\text{LVRT,eq},1} = k_{q1} \Delta U_1 + \varepsilon_1 = k_{q,\text{eq},1} \Delta U_{\text{eq}}$ 。随着电压跌落程度的加深,当 2 台分布式新能源机组都进入低电压无功管理环节时,机组 1 的无功附加电流仍为 $i_{q\text{LVRT}1} = k_{q1} \Delta U_1 + \varepsilon_1$, 机组 2 的无功附加电流为 $i_{q\text{LVRT}2} = k_{q2} \Delta U_2 + \varepsilon_2$ (ε_2 为常数), 则等值机的无功附加电流 $i_{q\text{LVRT,eq},2} = k_{q1} \Delta U_1 + \varepsilon_1 + k_{q2} \Delta U_2 + \varepsilon_2 =$

$k_{q,eq,2}\Delta U_{eq,0}$

根据上述结果,可得 n 台分布式新能源机组被等值时, $i_{qLVRT,eq}$ 为斜率单调递增的连续折线,见附录 A 图 A3。由图可知,当配电网中有 n 台被等值时, $i_{qLVRT,eq}$ 可采用式(9)所示分段函数近似拟合。

$$i_{qLVRT,eq} = \begin{cases} 0 & \Delta U_{eq} < \Delta U_{eq,q0} \\ a_q \Delta U_{eq}^2 + b_q \Delta U_{eq} + c_q & \Delta U_{eq,q0} \leq \Delta U_{eq} \leq \Delta U_{eq,qn} \\ k_{qc} \Delta U_{eq} & \Delta U_{eq} > \Delta U_{eq,qn} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\Delta U_{eq,q0}$ 为所有分布式新能源机组都未进入低电压无功管理环节时等值母线电压变化量的门槛值; $\Delta U_{eq,qn}$ 为所有分布式新能源机组都进入低电压无功管理时等值母线电压变化量的门槛值; a_q 、 b_q 、 c_q 和 k_{qc} 为拟合系数。

当等值母线电压的变化量处于 $[\Delta U_{eq,q0}, \Delta U_{eq,qn}]$ 区间时,从图 A3 可以看出,可采用系数为 a_q 、 b_q 和 c_q 的二次函数(见图 A3 中的红色虚线)拟合等值机的无功附加电流;当所有机组都进入低电压无功管理环节时, k_{qc} 为常数。

2.3 电流限幅环节的等值

当多台分布式新能源机组进行模型聚合时,需确定等值机组的电流限幅值。

1)当所有分布式新能源机组未进入电流限幅环节时,等值机的 d 轴和 q 轴电流为所有机组的对应电流之和,即:

$$\begin{cases} i_{q,eq} = \sum_{j=1}^n i_q(j) \\ i_{d,eq} = \sum_{j=1}^n i_d(j) \end{cases} \quad (10)$$

2)当部分机组进入电流限幅环节时,设有 n_1 台机组进入电流限幅环节, $n-n_1$ 台机组未进入电流限幅环节,由于采用无功优先控制,故等值机电流的 d 、 q 轴分量分别为:

$$\begin{cases} i_{q,eq} = \sum_{j=1}^{n_1} I_{\max}(j) + \sum_{j=n_1+1}^n i_q(j) \\ i_{d,eq} = \sum_{j=1}^n i_d(j) \end{cases} \quad (11)$$

3)当所有机组均进入电流限幅环节时,有:

$$\begin{cases} i_{q,eq} = \sum_{j=1}^n I_{\max}(j) = I_{\max,eq} \\ i_{d,eq} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $I_{\max,eq}$ 为所有分布式新能源机组的电流限幅值之和。从式(10)~(12)可以看出:由于受被等值机组进入电流限幅环节状态的影响,等值机的 d 、 q 轴电流限幅值将不再是确定值,其会随着电压跌落深度的变化而变化。

以等值机的 d 轴电流限幅值 $i_{dmax,eq}$ 为例进行分析,当所有分布式新能源机组均未进入电流限幅环节时, $i_{dmax,eq} = I_{\max,eq}$; 当有 n_1 台机组进入电流限幅环节时, $i_{dmax,eq} = \sum_{j=n_1+1}^n I_{\max}(j)$; 当所有分布式新能源都机组均进入电流限幅环节时, $i_{dmax,eq} = 0$ 。因此 $i_{dmax,eq}$ 随 ΔU_{eq} 的变化关系如附录 A 图 A4 所示。

除此以外,等值机电流的 d 、 q 轴分量还满足:

$$i_{d,eq}^2 + i_{q,eq}^2 \leq I_{\max,eq}^2 \quad (13)$$

根据图 A4,可将等值机的 d 轴电流限幅值 $i_{dmax,eq}$ 采用式(14)所示分段函数拟合。

$$i_{dmax,eq} = \begin{cases} \sum_{j=1}^n I_{\max}(j) & \Delta U_{eq} < \Delta U_{eq,l0} \\ a_1 \Delta U_{eq}^2 + b_1 \Delta U_{eq} + c_1 & \Delta U_{eq,l0} \leq \Delta U_{eq} \leq \Delta U_{eq,ln} \\ 0 & \Delta U_{eq} > \Delta U_{eq,ln} \end{cases} \quad (14)$$

式中: a_1 、 b_1 和 c_1 为二次函数拟合系数; $\Delta U_{eq,l0}$ 为所有分布式新能源机组都未进入电流限幅环节时等值母线电压变化量的门槛值; $\Delta U_{eq,ln}$ 为所有分布式新能源机组都进入电流限幅环节时等值母线电压变化量的门槛值。

3 多激励下多类型分布式新能源机组非线性环节的非机理等值建模

下面以 3 类分布式新能源并网的简单算例为例,分别给出分布式新能源机组低电压有功管理、低电压无功管理以及电流限幅环节在多激励下的非机理等值建模流程。

3.1 非机理等值建模流程

以低电压有功管理环节为例,多类型分布式新能源机组低电压有功管理环节的非机理等值建模流程见图 3。低电压无功管理环节以及电流限幅环节的非机理等值建模流程与图 3 基本一致,这里不再赘述。

3.2 算例分析

多类型分布式新能源机组的并网接线图如图 4 所示,2 台 DFIG、2 台 DDPMMSG 以及 1 台 PV 接入母线 B_2 ,其额定功率均为 1 MW,分布式新能源机组通过两级升压变压器接入 220 kV 系统,其参数采用 PSCAD / EMTDC 平台推荐的典型参数。假设分布式新能源机组均采用定无功控制方式,即 $Q_{\text{pref}} = 0$,低电压有功管理和无功管理环节分别见 1.2 节和 1.3 节,DFIG、DDPMMSG 以及 PV 的电流限幅值分别为 1.1、1.1、1.5 p.u.。并网阻抗分别为 $Z_1 = 0.22 + j1.07$ p.u., $Z_2 = 0.58 + j1.65$ p.u., $Z_3 = 2.12 + j5.18$ p.u., $Z_4 = 4.71 + j13.59$ p.u., $Z_5 = 6.81 + j19.03$ p.u.(基准容量为 1 MV·A)。

进行等值建模时,首先将各分布式新能源机组

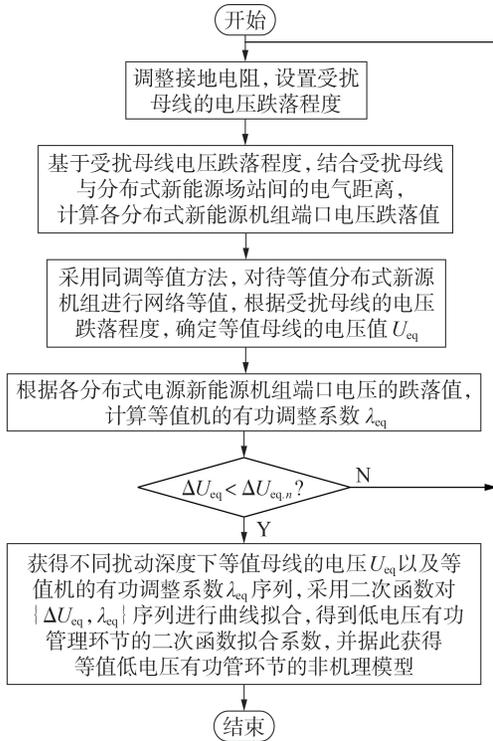


图 3 低电压有功管理环节的非机理等值建模流程

Fig.3 Non-mechanism equivalent modeling flowchart of low voltage active power management link

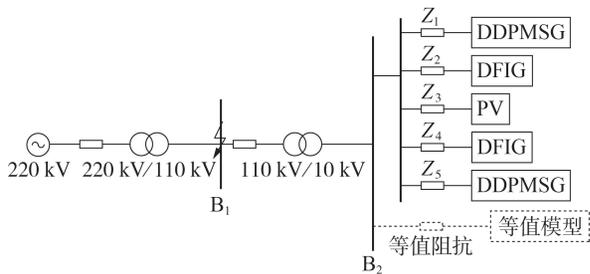


图 4 多类型分布式新能源机组的并网接线图

Fig.4 Grid-connected wiring diagram of multi-type distributed new energy units

采用图 A2 所示的通用模型结构表示,下面对各非线性环节的等值建模过程进行详细阐述。

3.2.1 低电压有功管理环节的非机理等值建模

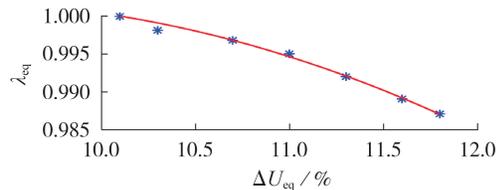
根据图 3 所示建模流程,设故障发生在母线 B_1 处,根据各分布式新能源机组与母线 B_2 的电气距离计算可得:当母线 B_2 的电压跌落小于 $10.1\%U_n$ 时,所有新能源机组都未进入低电压有功管理环节,即 $\Delta U_{eq,0} = 10.1\%U_n$;当母线 B_2 的电压跌落大于等于 $11.8\%U_n$ 时,所有分布式新能源机组都进入低电压有功管理环节,即 $\Delta U_{eq,n} = 11.8\%U_n$ 。

在母线 B_2 处设置不同电压跌落扰动,其变化区间为 $[10.1\%U_n, 11.8\%U_n]$,进而可得每种电压跌落程度下的 $\{\Delta U_{eq}, \lambda_{eq}\}$ 序列,最后采用二次函数拟合该序列,二次函数的拟合结果如式(15)及图 5(a)所示。

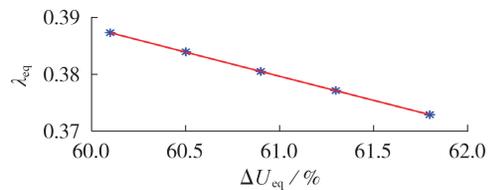
$$\lambda_{eq} = -21.03\Delta U_{eq}^2 + 3.84\Delta U_{eq} + 0.83 \quad (15)$$

此外,由于 DDPMSG 的有功调整系数存在分段特性,当母线 B_2 的电压跌落小于 $60.1\%U_n$ 时,所有 DDPMSG 的有功调整系数都不为 0;当母线 B_2 的电压跌落大于等于 $61.8\%U_n$ 时,所有 DDPMSG 的有功调整系数都为 0。因此,在母线 B_2 设置不同电压跌落扰动,其变化区间为 $[60.1\%U_n, 61.8\%U_n]$,进而可得每种电压跌落程度下的 $\{\Delta U_{eq}, \lambda_{eq}\}$ 序列,采用二次函数拟合该序列,二次函数的拟合结果如式(16)及图 5(b)所示。

$$\lambda_{eq} = 0.33\Delta U_{eq}^2 - 1.25\Delta U_{eq} + 1.11 \quad (16)$$



(a) $[10.1\%U_n, 11.8\%U_n]$ 的曲线拟合



(b) $[60.1\%U_n, 61.8\%U_n]$ 的曲线拟合

* 逐点计算值, — 拟合曲线

图 5 有功管理环节的非机理等值建模

Fig.5 Non-mechanism equivalent modeling of active power management link

3.2.2 低电压无功管理环节的非机理等值建模

采用与低电压有功管理环节等值相似的流程,可得母线 B_2 处的电压跌落小于 $10.1\%U_n$ 时,所有分布式新能源机组都未进入低电压无功管理环节,即 $\Delta U_{eq,q,0} = 10.1\%U_n$;当母线 B_2 处的电压跌落大于等于 $20.5\%U_n$ 时,所有分布式新能源机组都进入低电压无功管理环节,即 $\Delta U_{eq,q,n} = 20.5\%U_n$ 。

在母线 B_2 设置不同电压跌落扰动,其变化区间为 $[10.1\%U_n, 20.5\%U_n]$,进而可得每种电压跌落程度下的 $\{\Delta U_{eq}, i_{qLVRT,eq}\}$ 序列,最后采用二次函数拟合该序列,拟合结果见式(17)以及附录 A 图 A5。

$$i_{qLVRT,eq} = 5.78\Delta U_{eq}^2 - 1.08\Delta U_{eq} + 0.07 \quad (17)$$

3.2.3 电流限幅环节的非机理等值建模

在母线 B_2 处设置不同电压跌落程度的扰动,可得母线 B_2 的电压跌落小于 $34.16\%U_n$ 时,所有分布式新能源机组都未进入电流限幅环节,即 $\Delta U_{eq,ln} = 34.16\%U_n$;当母线 B_2 的电压跌落大于等于 $39.41\%U_n$ 时,所有分布式新能源机组都进入电流限幅环节,即 $\Delta U_{eq,ln} = 39.41\%U_n$ 。

在母线 B_2 处设置不同的电压跌落扰动,其变化

区间为 $[34.16\%U_n, 39.41\%U_n]$,可得每种电压跌落程度下的 $\{\Delta U_{eq}, i_{dmax,eq}\}$ 序列,采用二次函数拟合该序列,拟合结果见式(18)以及附录A图A6。由图可知, $i_{dmax,eq}$ 可近似由式(18)拟合。

$$i_{dmax,eq} = 117.89\Delta U_{eq}^2 - 105.01\Delta U_{eq} + 23.08 \quad (18)$$

综合图5、图A5和图A6的曲线拟合结果可以看出,采用图3、图A3和图A4所示的二次曲线拟合方法可以较好地进行部分分布式新能源机组进入LVRT或进入电流限幅环节时非线性环节的等值建模。

4 算例验证

将所提多类型分布式新能源机组非线性环节的非机理等值建模方法进一步应用于主动配电网中,进行机组等值建模,并将等值模型与传统负荷模型并联作为主动配电网的等值模型。

以附录A图A7所示的某实际10 kV主动配电网为例,基于PSCAD/EMTDC平台搭建该仿真系统。设线路阻抗为 $0.116+j0.1067 \Omega/\text{km}$,静态负荷的电阻 R_z 与电抗 X_z 的比值满足 $R_z/X_z=5$,感应电动机负荷参数见附录A表A1。图A7中,分布式新能源的出力占总负荷比例的104.44%,其中DFIG、DDPMSG以及PV的出力分别占新能源总出力的37.04%、37.04%和25.93%。

4.1 分布式新能源机组非线性环节的等值建模

首先采用图A2所示的通用模型表示各分布式新能源机组,然后对各分布式新能源机组进行等值建模。等值时对其中的线性环节采用参数辨识方法获取重点参数,对其中的非线性环节采用本文所提等值建模方法。

在多扰动激励下,扰动设置为母线 A_1 处发生三相短路故障,通过调整接地电阻使得母线 A_2 的电压分别发生不同程度的跌落。根据各分布式新能源机组与扰动点的电气距离,可得等值机进入低电压有功管理环节的等值母线电压变化量阈值分别为 $\Delta U_{eq,0}=10.2\%U_n$ 和 $\Delta U_{eq,n}=11.8\%U_n$ 。与此同时,可计算得到当等值母线电压的变化量处于区间 $[60.2\%U_n, 61.4\%U_n]$ 内时,部分DDPMSG的有功调整系数为0。

因此,在母线 A_2 处分别设置变化量处于区间 $[10.2\%U_n, 11.8\%U_n]$ 和 $[60.2\%U_n, 61.4\%U_n]$ 内的电压跌落扰动,得到相应的 $\{\Delta U_{eq}, \lambda_{eq}\}$ 序列,采用二次函数拟合,结果见附录A式(A1)。同理,进行低电压无功管理环节等值时,根据各分布式新能源与扰动点的电气距离,计算得到 $\Delta U_{eq,q0}=10.2\%U_n$, $\Delta U_{eq,qn}=21.1\%U_n$ 。在此区间内根据所得 $\{\Delta U_{eq}, i_{qLVRT,eq}\}$ 序列,采用二次函数拟合,结果见附录A式

(A2)。进行电流限幅环节等值时,计算得到 $\Delta U_{eq,10}=34.26\%U_n$, $\Delta U_{eq,1n}=40.1\%U_n$ 。在此区间内根据所得 $\{\Delta U_{eq}, i_{dmax,eq}\}$ 序列,采用二次函数拟合,结果见附录A式(A3)。由式(A1)—(A3)可得不同电压跌落程度下非线性环节的等值参数。

4.2 主动配电网的等值建模验证

由文献[20]可知传统综合负荷模型的待辨识参数为并网等值阻抗 $(R_{CLM}+jX_{CLM})$,感应电动机的定子电抗 X_s 、初始转差率 s_0 以及惯性时间常数 H ;此外还有感应电动机消耗有功占综合负荷消耗有功的比例 K_{IM} 。而对于分布式新能源机组,由文献[4]可知,其重点参数为并网等值阻抗 $(R_{DG}+jX_{DG})$,换流器有功控制环节、无功控制环节外环的比例积分参数 K_{pp} 、 K_{pi} 、 K_{qp} 和 K_{qi} ,以及锁相环的比例积分参数 K_{PLLp} 和 K_{PLLl} ,此外还有分布式新能源机组输出功率占综合负荷总消耗功率的比例 K_{DC} 。由此确定15个待辨识的参数,分别为 $\{R_{DG}, X_{DG}, R_{CLM}, X_{CLM}, K_{pp}, K_{pi}, K_{qp}, K_{qi}, K_{PLLp}, K_{PLLl}, X_s, s_0, H, K_{DG}, K_{IM}\}$,其余参数采用典型值。设 $t=5$ s时母线 A_1 处发生三相短路故障,通过调整接地电阻使得母线 A_2 电压跌落 $10.5\%U_n$,故障持续0.2 s后消失,系统恢复至原状态。由式(A1)—(A3)可得此时的 $\lambda_{eq}=0.9977$, $i_{qLVRT,eq}=0.0340$ p.u., $i_{dmax,eq}=1.2037$ p.u.。

仿真得到该故障下母线 A_2 处的有功功率及无功功率受扰轨迹,以此为基准,采用曲线拟合方法辨识待辨识参数。曲线拟合采用综合粒子群优化算法,其中,初始粒子数和学习因子分别为10和2,最大迭代次数为200。针对粒子群优化算法易进入局部极值点的问题,本文按Logistic函数实现非线性动态递减惯性权重,以防止算法收敛到局部极值点。具体为:

$$w_{(T+1)} = w_{max} - (w_{max} - w_{min}) \frac{1}{1 + ab^{10077T}} \quad (19)$$

式中: $w_{(T+1)}$ 为第 $T+1$ 次迭代的权重, T 为迭代次数; T_{max} 为最大迭代次数; w_{max} 、 w_{min} 分别为权重最大值、最小值; a 和 b 为控制因子,当 $a=42$ 和 $b=0.77$ 时算法性能较好。当进行参数辨识时,等值模型中综合负荷和分布式新能源机组的初值为详细模型参数的加权平均值。

参数辨识的目标为:

$$\min E_{err} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^{i=K} \left[\left(\frac{P_{sim}(i) - P_{real}(i)}{P_{real}(i)} \right)^2 + \left(\frac{Q_{sim}(i) - Q_{real}(i)}{Q_{real}(i)} \right)^2 \right] \quad (20)$$

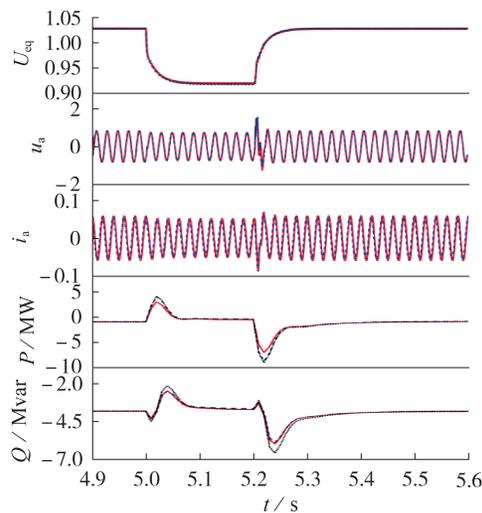
式中: E_{err} 为误差; P 、 Q 分别为母线 A_2 处的有功、无功功率,下标sim和real分别表示基于等值模型的仿真结果以及基于详细模型的仿真结果; K 为受扰轨迹

时间窗口内的总采样点数,采样步长为 10^{-5} s。参数辨识结果见表 1,表中 R_{DC} 、 X_{DC} 、 R_{CLM} 、 X_{CLM} 、 X_S 的辨识值为标么值。

表 1 参数辨识结果

参数	辨识值	参数	辨识值
R_{DC}	0.3411	X_{DC}	0.3619
K_{pp}	2.8013	K_{pi}	0.2127
K_{qp}	2.1333	K_{qi}	0.6210
K_{PLLp}	99.3814	K_{PLLi}	1677.7144
R_{CLM}	0.4782	X_{CLM}	0.3639
X_S	0.0881	H/s	0.9300
$s_0/\%$	1.8822	$K_{DC}/\%$	105.2616
$K_{IM}/\%$	54.5178		

当母线 A_2 电压跌落 $10.5\%U_n$ 时,详细模型和基于表 1 参数的等值模型在等值母线 A_2 处有功功率 P 、无功功率 Q 、等值电压 U_{eq} 、a 相瞬时电压 u_a 和瞬时电流 i_a 的受扰轨迹对比情况如图 6 所示,图中, U_{eq} 、 u_a 和 i_a 均为标么值,后同。此时,由式(20)可计算出详细模型和等值模型的误差为 0.0195。可以看出,等值模型具有较好的拟合精度。同时,针对现有研究等值时大多未考虑分布式新能源机组 LVRT 的情况,图 6 给出了未考虑 LVRT 时等值模型的功率响应,模型参数设置与表 1 相同,此时详细模型和未考虑 LVRT 等值模型的误差为 0.0209。可以看出,考虑 LVRT 的等值模型具有更好的拟合精度。



— 详细模型, --- 等值模型, —— 未考虑 LVRT 的等值模型

图 6 电压跌落 $10.5\%U_n$ 时详细模型和等值模型受扰轨迹Fig.6 Disturbed trajectories of equivalent model and detail model under $10.5\%U_n$ voltage dip

上述扰动下,只有部分分布式新能源机组进入 LVRT,为进一步验证所有分布式新能源机组都进入 LVRT 时的模型适应性,设置新的扰动为 $t=5$ s 时母线 A_1 处发生三相短路故障,通过调整接地电阻使得

母线 A_2 电压跌落了 $30\%U_n$,故障持续 0.2 s 后消失,系统恢复至原状态。

由式(A1)—(A3)求得此时非线性环节参数分别为 $\lambda_{eq}=0.775$, $i_{qLVRT,eq}=0.174$ p.u., $i_{dmax,eq}=1.2037$ p.u.。该扰动下,详细模型和基于表 1 参数的等值模型在等值母线 A_2 处有功功率 P 、无功功率 Q 、等值电压 U_{eq} 、a 相瞬时电压 u_a 和瞬时电流 i_a 的受扰轨迹对比情况如附录 A 图 A8 所示。此时,详细模型与等值模型及不考虑 LVRT 的等值模型的误差分别为 0.0282 和 0.0577。由图可知,当所有分布式新能源机组都进入 LVRT 状态后等值模型也具有较高的等值精度;当不考虑 LVRT 等值时,其等值模型随着分布式新能源机组进入 LVRT 状态的数目增多, LVRT 出力逐步增大,拟合误差逐渐增大。

4.3 不对称电压跌落时等值模型的适应性分析

上述仿真验证了网侧对称故障下等值模型的精度,下面进一步分析网侧不对称故障下等值方法的适应性。新的扰动设置为 $t=5$ s 时母线 A_1 处发生 ab 两相短路故障,且其电压皆跌落 $50\%U_n$,故障持续 0.2 s 后消失,系统恢复至原状态。由式(A1)—(A3)可得此时非线性环节参数分别为 $\lambda_{eq}=0.8095$, $i_{qLVRT,eq}=0.1593$ p.u., $i_{dmax,eq}=1.2037$ p.u.。该扰动下,详细模型和基于表 1 参数的等值模型在等值母线 A_2 处有功功率 P 、无功功率 Q 、等值电压 U_{eq} 、a 相瞬时电压 u_a 和瞬时电流 i_a 的受扰轨迹对比情况如附录 A 图 A9 所示。此时 2 个模型间的误差为 0.1672。由图可知,不对称故障下等值模型仍具有较好的等值精度,但是相比于对称故障,其等值误差有了一定程度的提高,该现象是由系统不对称故障下产生的谐波所造成的。

5 结论

本文基于 PSCAD / EMTDC 平台推荐的分布式新能源机组的详细模型,研究了 DFIG、DDPMSG 以及 PV 非线性环节的等值建模方法。针对配电网中分布式新能源机组的地理位置不同、LVRT 控制策略差异导致其非线性环节运行状态的差异,分析了等值模型中低电压有功调整系数、无功附加电流以及电流限幅值与等值母线电压跌落程度的关系,得到了近似表达各非线性环节的非机理模型。算例仿真表明所提模型具有较好的适应性。

将所建多类型分布式新能源机组通用模型与传统综合负荷并联作为主动配电网的等值模型。以某实际主动配电网为例,发现当网侧发生对称故障时,建立的模型能较好地描述计及 LVRT 时,含多类型分布式新能源机组主动配电网的动态特性;当网侧发生不对称故障时,等值模型的拟合精度较好,但对

不对称故障下谐波的拟合精度不高。

本文所采用的DFIG、DDPMSG以及PV模型基于PSCAD/EMTDC平台的推荐模型结构及参数,但所提建模方法也适用于分布式新能源机组的其他模型结构或参数。

本文的创新点在于针对主动配电网中分布式新能源机组种类较多、位置较分散的问题,提出了多类型分布式新能源机组的等值建模方法,尤其是给出了非线性环节的等值建模方法。后续将针对主动配电网中电子电子化负荷,研究含高比例电力电子设备

的主动配电网等值建模方法。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] ARIF A, WANG Z, WANG J, et al. Load modeling—a review [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6):5986-5999.
- [2] MILANOVIĆ J V, MAT-ZALI S. Validation of equivalent dynamic model of active distribution network cell[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2101-2110.
- [3] 马亚辉, 李欣然, 徐振华, 等. 一种逆变并网型分布式电源统一模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9):145-154.
MA Yahui, LI Xinran, XU Zhenhua, et al. A unified model of grid-connected distributed generation through inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9):145-154.
- [4] 潘学萍, 冯徐徐, 鞠平, 等. 含直驱永磁风电场的配电网广义负荷建模[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4):62-68.
PAN Xueping, FENG Xuxu, JU Ping, et al. Generalized load modeling of distribution network integrated with direct-drive permanent-magnet wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4):62-68.
- [5] 徐振华, 李欣然, 宋军英, 等. 考虑双馈风电机的配网广义综合负荷建模[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7):234-242.
XU Zhenhua, LI Xinran, SONG Junying, et al. Load modeling considering Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) integrated into distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7):234-242.
- [6] 吴峰, 戴小妹. 计及高渗透率光伏的配电网广义负荷一体化等值建模[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5):1-9, 46.
WU Feng, DAI Xiaomei. Integrated equivalent modeling for generalized loads of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5):1-9, 46.
- [7] 韩平平, 范桂军, 孙维真, 等. 基于数据测试和粒子群优化算法的光伏逆变器LVRT特性辨识[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2):49-54.
HAN Pingping, FAN Guijun, SUN Weizhen, et al. Identification of LVRT characteristics of photovoltaic inverters based on data testing and PSO algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2):49-54.
- [8] 张文娟, 马浩森, 张飞鸽, 等. 基于模糊切换的DFIG转子串联双动态电阻LVRT优化控制[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7):58-64.
ZHANG Wenjuan, MA Haomiao, ZHANG Feige, et al. LVRT optimal control of DFIG using rotor series double dynamic resistance based on fuzzy switching[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7):58-64.
- [9] HISKENS I A. Dynamics of type-3 wind turbine generator models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1):465-474.
- [10] 查晓明, 张杨, 成燕, 等. 用于简化微电网结构的微分几何广义同调方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1):24-31.
ZHA Xiaoming, ZHANG Yang, CHENG Yan, et al. New method of extended coherency for micro-grid based on homology in differential geometry[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1):24-31.
- [11] 廖书寒, 查晓明, 黄萌, 等. 适用于电力电子化电力系统的同调等值判据[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9):2589-2598, 2827.
LIAO Shuhan, ZHA Xiaoming, HUANG Meng, et al. Coherency criterion applicable to power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9):2589-2598, 2827.
- [12] 赵学深, 朱琳, 郭力, 等. 基于等值单机非线性模型的多换流器并联直流系统暂态稳定性分析及控制参数整定方法[J/OL]. 中国电机工程学报. [2022-04-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220121.1445.002.html>.
- [13] CHAO Pupu, LI Weixing, LIANG Xiaodong, et al. An analytical two-machine equivalent method of DFIG-based wind power plants considering complete FRT processes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4):3657-3667.
- [14] CHAO Pupu, LI Weixing, PENG Simin, et al. Fault ride-through behaviors correction-based single-unit equivalent method for large photovoltaic power plants[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1):715-726.
- [15] NAHID-MOBARAKEH B, MEIBODY-TABAR F, SARGOS F M. Mechanical sensorless control of PMSM with online estimation of stator resistance[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(2):457-471.
- [16] DING Xinzong, ZHANG Chengrui, YU Lehua, et al. A new state estimator of PMSM using adaptive extended Kalman filter[J]. Advanced Materials Research, 2012, 430-432:772-780.
- [17] GENG S, HISKENS I A. Second-order trajectory sensitivity analysis of hybrid systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2019, 66(5):1922-1934.
- [18] ALONSO J C G, GOHARRIZI A Y, BORISOVA E, et al. Benchmark model of type-IV wind turbine in PSCAD/EMTDC [C]//2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Atlanta, USA: IEEE, 2019: 1-5.
- [19] GOHARRIZI A Y, GARCIA-ALONSO J C, BORISOVA E, et al. Benchmark model of type-III wind turbine for research and development applications[C]//2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering. Quebec, Canada: IEEE, 2018: 1-6.
- [20] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010:265-274.

作者简介:



陈海东

陈海东(1989—),男,博士研究生,主要研究方向为主动配电网动态等值建模(E-mail: xiaohaidong30@163.com);

潘学萍(1972—),女,教授,博士,主要研究方向为新能源电力系统建模、分析与控制(E-mail: xueping_pan@hhu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

(下转第39页 continued on page 39)

Load forecasting of integrated energy system based on MMoE multi-task learning and LSTM

WU Chen¹, YAO Jing², XUE Guiyuan¹, WANG Jianxiao³, WU Yin¹, HE Kai²

(1. Economic Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, China;

2. Beijing Tsintergy Technology Co., Ltd., Beijing 100080, China;

3. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Accurate multivariate load forecasting is the key to realize optimal scheduling and economic operation of IES (Integrated Energy System). On the basis of considering the correlation of multivariate loads, a multivariate load forecasting method based on MMoE (Multi-gate Mixture-of-Experts) multi-task learning and LSTM (Long Short-Term Memory network) is proposed. The Pearson correlation coefficient is used to analyze the strong and weak correlation between cooling, heating, electric load and meteorological factors. Then, the MMoE multi-task learning model is constructed, and the expert subnetworks and gating units are used to learn the difference of coupling characteristics among multivariate loads. Moreover, the subtask model is constructed using LSTM to forecast multivariate loads. The performance is validated by public datasets, and results show that the proposed model based on MMoE multi-task learning and LSTM can effectively improve the accuracy of multivariate load forecasting.

Key words: multivariate load forecasting; integrated energy system; correlation analysis; MMoE multi-task learning; LSTM; expert network

(上接第 32 页 continued from page 32)

Equivalent modeling of LVRT and current limiting links for distributed photovoltaic and wind turbine generators

CHEN Haidong¹, PAN Xueping¹, HUANG Hua², SUN Xiaorong¹, HE Dazhuang¹, YONG Chengli¹

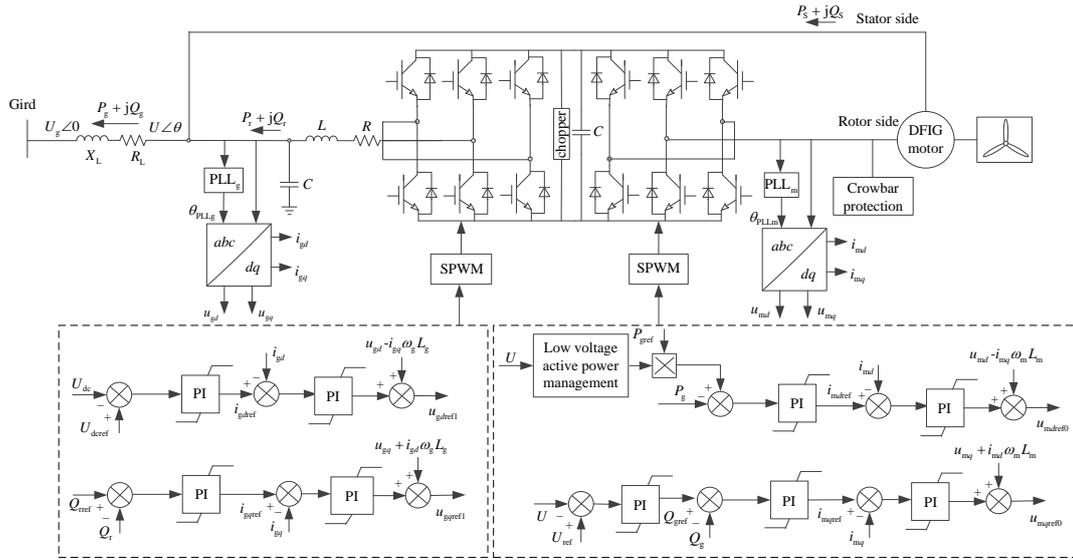
(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

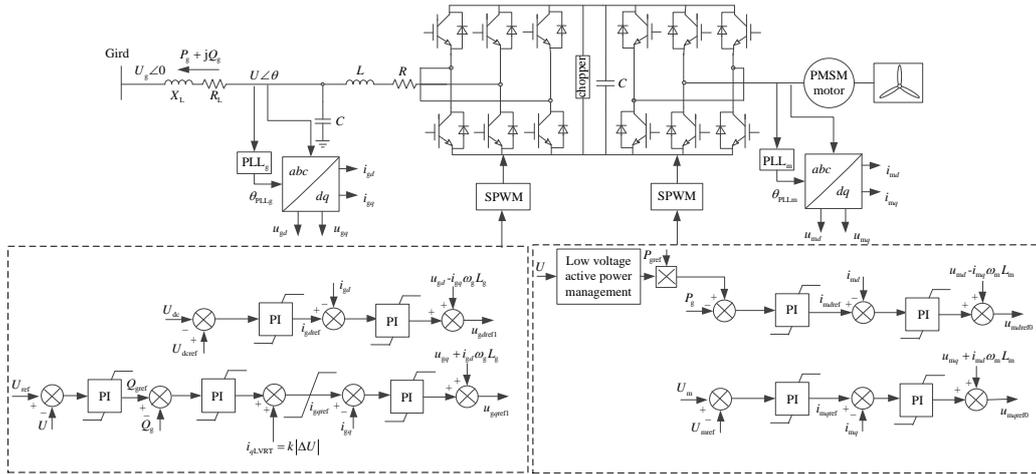
Abstract: With the increasing integration of distributed new energy units, the dynamic characteristics of power load have significantly changed, it is necessary to study a new equivalent modeling method for active distribution networks. The types of distributed new energy units in the active distribution network are diversified, and the controller has nonlinear links such as switching and limiting. For this reason, with the common characteristics of model structure of doubly-fed induction generator-based wind turbines, direct drive permanent magnet synchronous generator-based wind turbines, and photovoltaic generation, a general model of distributed new energy units is constructed. On this basis, a new non-mechanistic equivalent modeling method for nonlinear links under effect of multi-excitations is proposed, and the results are verified by a simple simulation example. An actual active distribution network is simulated and the results demonstrate that when combines the equivalent model and the classical load model in paralleled, it can accurately describe the dynamic characteristics of the active distribution network considering LVRT (Low Voltage Ride-Through) and current limiting links of the distributed new energy units.

Key words: distributed new energy units; dynamic characteristics; active distribution network; nonlinear links; low voltage ride-through; equivalent modeling

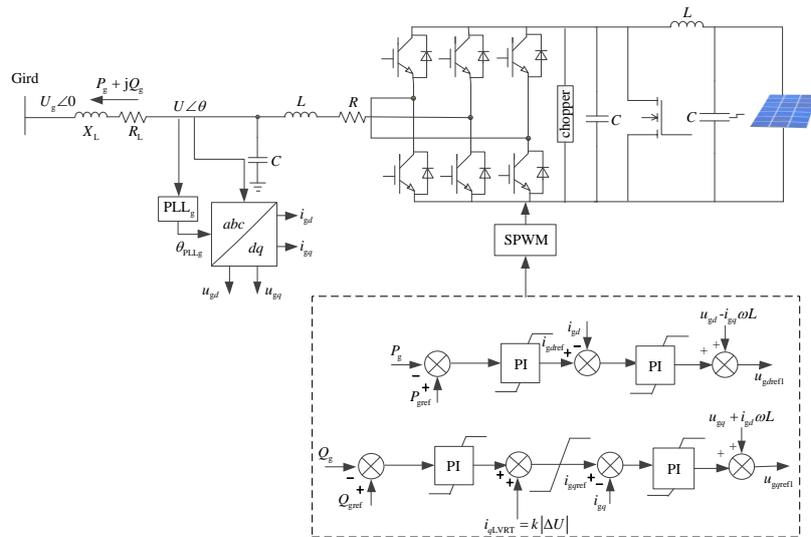
附录 A



(a) DFIG



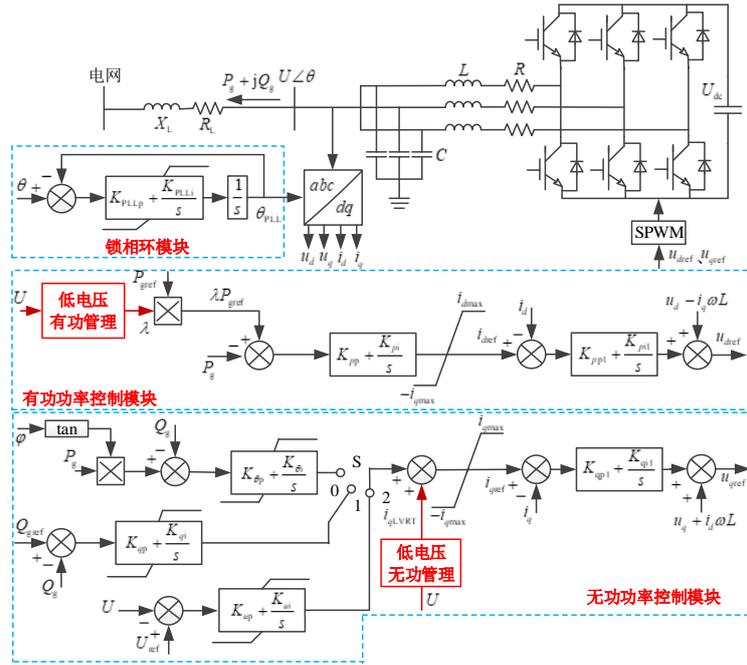
(b) DDPMSG



(c) PV

图 A1 分布式新能源机组的模型结构

Fig. A1 Model structure of distributed new energy units



注： P_g 和 Q_g 分别为新能源发出的有功功率和无功功率； U 和 θ 分别为新能源端口电压的幅值和相角； U_n 为额定电压； R_L 和 X_L 为线路电阻和电抗； u_d 和 u_q 分别为新能源端口电压的 d 轴和 q 轴分量； i_d 和 i_q 分别为新能源端口电流的 d 轴和 q 轴分量；下标 ref 表示参考值； i_{dmax} 和 i_{qmax} 分别为 d 轴和 q 轴电流的限幅值； U_{dc} 为直流侧电压； φ 为功率因数角； ω 为同步频率； R 、 L 和 C 分别为滤波元件的电阻、电感和电容；PLL 为锁相环， θ_{PLL} 为锁相环输出相角； K_{PLLp} 和 K_{PLLl} 分别为锁相环控制环节的比例和积分系数； K_{pp} 和 K_{pi} 分别为有功功率外环控制的比例和积分系数； K_{pp1} 和 K_{pi1} 分别为有功功率内环控制的比例和积分系数；开关 S 分别对应无功功率控制的 3 种方式，分别为定功率因数控制、定无功功率控制和定电压控制，其中， $K_{\theta p}$ 和 $K_{\theta i}$ 为定功率因数控制的比例和积分系数； K_{qp} 和 K_{qi} 分别为定无功功率控制的比例和积分系数； K_{up} 和 K_{ui} 分别为定电压控制的比例和积分系数； K_{qp1} 和 K_{qi1} 分别为定无功功率内环控制的比例和积分系数； k_q 为无功附加电流系数。

图 A2 多类型分布式新能源机组的通用模型结构

Fig.A2 General model structure of multi-type distributed new energy units

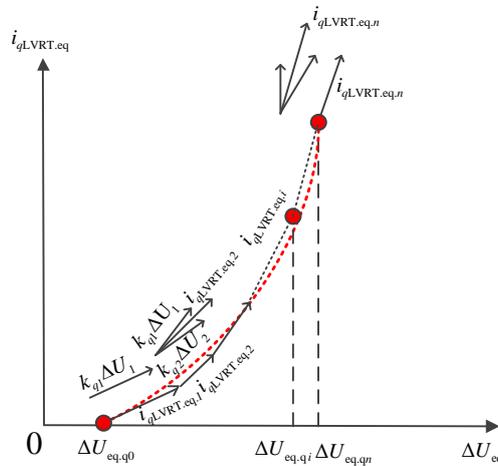


图 A3 低电压无功管理环节的模型聚合

Fig.A3 Model aggregation of low voltage reactive power management link

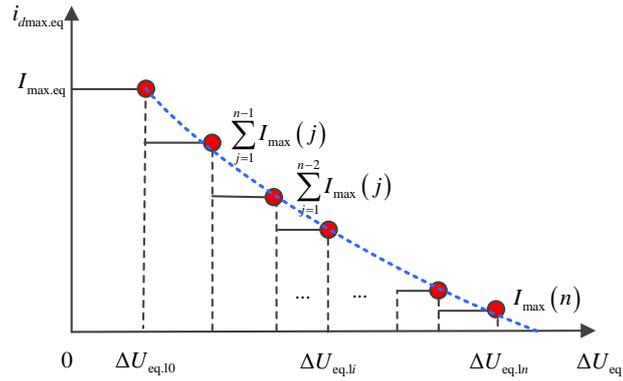


图 A4 等值机 d 轴电流限值与等值母线电压的关系

Fig.A4 Relationship between d -axis current limit value of equivalent model and equivalent bus voltage

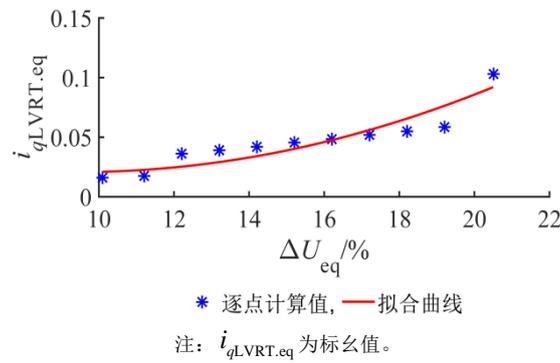


图 A5 无功管理环节的非机理等值建模

Fig.A5 Non-mechanism equivalent modeling of reactive power management link

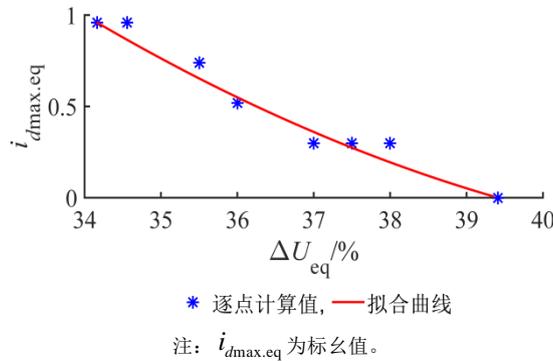


图 A6 电流限幅环节的非机理等值建模

Fig.A6 Non-mechanism equivalent modeling of current limit link

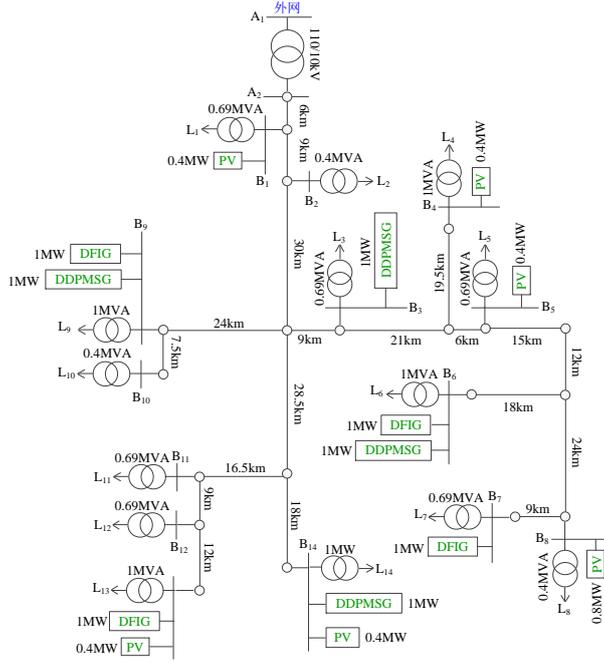


图 A7 实际 10 kV 主动配电网

Fig.A7 A real 10kV active distribution network

表 A1 负荷参数

Table A1 Load parameters

母线序号	电动机比例	定子电抗	惯性时间常数	初始滑差
1, 7	40%	0.065	1.0s	1.9149%
3, 5, 13	60%	0.088	0.8s	2.2870%
2, 10, 11	65%	0.10	1.4s	1.3147%
6, 14	40%	0.12	1.4s	2.5831%
8, 12	45%	0.10	0.56s	1.1178%
4, 9	70%	0.076	0.56s	1.9932%

表中：定子电抗为标么值。

$$\lambda_{eq} = \begin{cases} 1, & \Delta U_{eq} \leq 10.2\% U_n \\ -40.83\Delta U_{eq}^2 + 8.17\Delta U_{eq} + 0.59, & 11.8\% U_n \geq \Delta U_{eq} \geq 10.2\% U_n \\ -1.15\Delta U_{eq} + 1.12, & 60.2\% U_n \geq \Delta U_{eq} \geq 11.8\% U_n \\ 31.25\Delta U_{eq}^2 - 38.66\Delta U_{eq} - 12.38, & 61.4\% U_n \geq \Delta U_{eq} \geq 60.2\% U_n \\ -1.09\Delta U_{eq} + 1.09, & \Delta U_{eq} \geq 61.4\% U_n \end{cases} \quad (A1)$$

$$i_{qLVRT,eq} = \begin{cases} 0, & \Delta U_{eq} < 10.2\% U_n \\ 12.79\Delta U_{eq}^2 - 3.21\Delta U_{eq} + 0.23, & 21.1\% U_n \geq \Delta U_{eq} \geq 10.2\% U_n \\ 0.58\Delta U_{eq}, & \Delta U_{eq} \geq 21.1\% U_n \end{cases} \quad (A2)$$

$$I_{dmax,eq} = \begin{cases} 1.2037, & \Delta U_{eq} < 34.26\% U_n \\ 294.38\Delta U_{eq}^2 - 239.52\Delta U_{eq} + 48.71, & 40.1\% U_n \geq \Delta U_{eq} \geq 34.26\% U_n \\ 0, & \Delta U_{eq} \geq 40.1\% U_n \end{cases} \quad (A3)$$

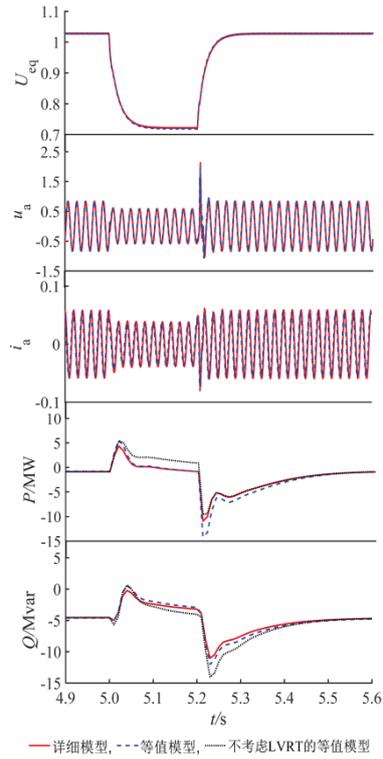


图 A8 电压跌落 30% U_n 时详细模型和等值模型的受扰轨迹

Fig.A8 Disturbed trajectories of equivalent model and detail model under 30% U_n voltage dip

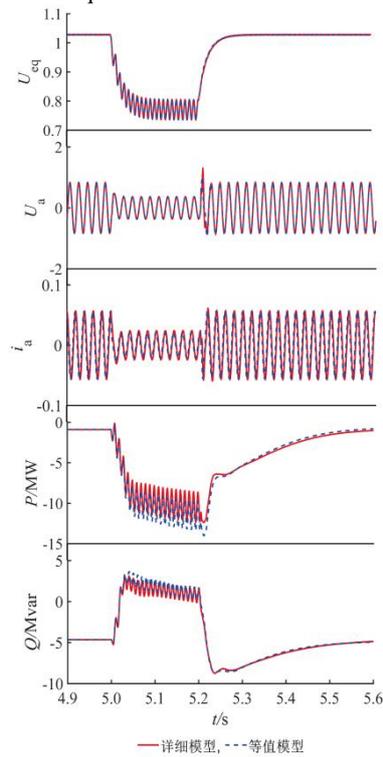


图 A9 不对称故障下详细模型和等值模型的受扰轨迹

Fig.A9 Disturbed trajectories of equivalent model and detail model under unsymmetrical fault