

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.02.028

计及风光相位特性和机-网间元件的短路电流计算方法

乔立¹, 黄梓欣², 章谋成³, 魏繁荣², 赵红生¹, 刘巨¹

(1. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430074;

2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;

3. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:以风电和光伏为代表的新能源机组大量接入电网使得短路电流的精确计算校核变得困难。针对最新研究中构建新能源并网点短路电流映射模型时,未考虑相位映射及未计及箱变、集电线路、主变及送出线路等机端到并网点间电气元件(机-网间元件)影响的理论缺陷,文中提出一种计及新能源相位特性和机-网间元件影响的改进工程化电网短路电流计算方法。首先,结合国家运行规程对新能源机端电压-短路电流相位映射进行有补充意义的理论建模。其次,对该模型进行工程化处理,并提出一种将所得映射逆推至并网点的迭代计算方法。继而,将工程化后的并网点短路电流幅相映射模型应用到现有局部迭代计算中,得到改进的计算方法。最后,在PSCAD仿真软件中搭建新能源并网模型,验证了新能源机端电压-短路电流理论幅相映射的准确性、机端映射模型逆推至并网点的迭代计算理论有效性;在此基础上,在IEEE 39节点系统对所得映射模型进行实验验证。结果表明所提改进计算方法能在一定程度上提升短路电流计算精度。

关键词:工程迭代;风光机组;新能源;短路电流计算;精度提升;机-网间元件;幅相映射

中图分类号:TM744

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)02-0241-09

0 引言

短路电流计算问题是电网发展规划中不可避免的关键问题之一。从长远来看,随着新型电力系统中以风电和光伏(photovoltaic, PV)为代表的新能源装机规模逐年增加,其有别于常规机组的短路特性^[1-4]将在一定程度上影响电网短路电流的精确计算。一般情况下,电网内部节点母线出口发生三相短路的电流数值相较其他故障类型更大,这将作为断路器电气选型的关键参考因素,若再叠加新能源的全新短路电流特性,可能对电网的发展规划及保护配置^[5-7]等产生更加深远的影响。为此,专家学者们针对含新能源电网的短路电流计算方法开展了相关研究。

从工程应用层面出发,在电网内部故障时,现有短路电流求解软件中一般不计及新能源机组的馈流效果,易造成短路电流的计算值偏小。也有算法将新能源等效为1.2~1.5倍额定电流的恒定电流源^[8-9],没有考虑新能源设备的电力电子特性,计算结果与实际值之间存在理论偏差。而在未来高比例甚至全比例新能源接入的新型电力系统中,上述算法均不再适用。从理论分析层面出发,计算电网短路电流一般采用迭代法^[10-13]。为此,保护与控制

领域的学者们对新能源的短路电流进行了精细化分析建模,文献[14-16]分别推导了永磁同步发电机(permanent magnetic synchronous generator, PMSG)、双馈风力发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)、PV的机端短路电流特性。上述模型在理论层面计算精确度较高,但过于依赖机组的运行参数,在已高度商业化的新能源机组中推广困难,且上述研究均针对新能源机组层面的短路电流,而非大电网层面的短路电流,难以应用于工程化的电网短路电流计算软件中。

有最新研究针对上述问题给出了解决思路,文献[17]提出构建新能源机端电压-短路电流的工程映射关系,并设定局部迭代区域以平衡计算精度与计算量。但该项研究仍存在以下不足之处:仅考虑了幅值映射关系,理论上,短路电流相位也能在一定程度上影响短路电流大小,充分考虑其相位有望提升短路电流计算精度;此外,该项研究通过工程实测数据拟合得到并网电压-短路电流的幅值映射关系,并将其与新能源机端理论特性对比。然而,新能源机组到并网点一般须通过箱变、集电线路、主变及送出线路等机-网间电气元件,文献[17]无法印证新能源机端的映射关系。因此,须进一步计及上述电气元件对短路电流映射模型的影响。

综上,为完善现有新能源短路电流计算的理论缺陷与不足,并提升其计算精度,文中补充性地提出考虑新能源机端电压-短路电流的幅相映射模型,

收稿日期:2022-09-14;修回日期:2022-12-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107095)

对其进行工程化处理后,进一步提出计及机-网间电气元件影响的迭代计算理论,将新能源机端幅相映射逆推至并网点得到短路电流工程计算模型,最终将此模型应用于现有短路电流的局部迭代计算方法中。

1 电网短路时新能源机端电压-短路电流的幅相映射

1.1 电网短路时 PMSG 机端电压-短路电流的幅相映射建模

按照国家标准风电场运行规程^[18],PMSG 的网侧变流器控制内环 d 、 q 轴的电流参考值 i_d^* 、 i_q^* 应满足:

$$\begin{cases} i_q^* = \begin{cases} 0 & 0.9 < U \leq 1 \\ 1.5 \times (0.9 - U) & 0.2 \leq U \leq 0.9 \end{cases} \\ i_d^* = \begin{cases} \min(P_{\text{ref(PMSG)}}/U, \sqrt{1.5^2 - (i_q^*)^2}) & 0.2 \leq U \leq 0.9 \\ 0.2 \leq U \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中: U 为新能源机组的机端电压; $P_{\text{ref(PMSG)}}$ 为正常运行时 PMSG 的参考有功功率; 1.5 为表征 PMSG 过流能力的典型值,该值的选取范围一般在 1.2~2.0 之间^[19-20]。

同时,PMSG 的短路电流应满足:

$$\begin{cases} I_{\text{PMSG}} = \sqrt{(i_d^*)^2 + (i_q^*)^2} I_{\text{N(PMSG)}} \\ \theta_{\text{PMSG}} = \arctan(i_q^*/i_d^*) \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_{PMSG} 为 PMSG 的短路电流幅值; $I_{\text{N(PMSG)}}$ 为 PMSG 机组的额定电流; θ_{PMSG} 为 PMSG 机端电压与短路电流之间的相角差。

根据式(1)、式(2)可求出 I_{PMSG} 、 θ_{PMSG} 的解析表达式为:

$$I_{\text{PMSG}} = \begin{cases} 1.5 I_{\text{N(PMSG)}} & 0.2 \leq U < 0.7 \\ I_{\text{N(PMSG)}} \sqrt{[1.5 \times (0.9 - U)]^2 + (1/U)^2} & 0.7 \leq U < 0.9 \\ I_{\text{N(PMSG)}}/U & 0.9 \leq U \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\theta_{\text{PMSG}} = \begin{cases} \arctan\left(\frac{1.5 \times (0.9 - U)}{\sqrt{1.5^2 - [1.5 \times (0.9 - U)]^2}}\right) & 0.2 \leq U < 0.7 \\ \arctan(1.5 \times (0.9 - U)U) & 0.7 \leq U < 0.9 \\ 0^\circ & 0.9 \leq U \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

1.2 电网短路时 DFIG 机端电压-短路电流的幅相映射建模

DFIG 同样要满足国家标准风电场运行规程,其短路电流特性须充分计及撬棒(Crowbar)电路的影

响^[21-23],这导致网侧变流器在 DFIG 端口的电压跌落至 U_d 后被闭锁, U_d 为 Crowbar 投入的机端电压。此外,在大电网级短路电流计算中一般考量的电气量为三相稳态短路电流,因此文中仅考虑 DFIG 的定子基频短路电流 I_{DFIG_1} ,可表示为:

$$I_{\text{DFIG}_1} = \frac{L_r(L_s L_r - L_m^2)[1/\tau_{rc} + j(\omega_1 - \omega_r)] - R_{rc} L_m^2 U}{\omega_1(L_s L_r - L_m^2)^2[1/\tau_{rc} + j(\omega_1 - \omega_r)]} \quad (5)$$

式中: L_s 、 L_r 、 L_m 分别为定子电感、转子电感和定子互感; τ_{rc} 为转子衰减常数; R_{rc} 为转子等效电阻; ω_1 、 ω_r 分别为同步角频率及转子角频率。

由此可得 DFIG 机端电压-短路电流的幅相映射为:

$$I_{\text{DFIG}} = \begin{cases} |I_{\text{DFIG}_1}| & 0.2 \leq U < U_d \\ 1.5 I_{\text{N(DFIG)}} & U_d \leq U < 0.7 \\ \sqrt{[1.5 \times (0.9 - U)]^2 + (1/U)^2} I_{\text{N(DFIG)}} & 0.7 \leq U < 0.9 \\ I_{\text{N(DFIG)}}/U & 0.9 \leq U \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\theta_{\text{DFIG}} = \begin{cases} \arctan\left(\frac{R_{rc} L_m^2 (\omega_1 - \omega_r)}{A}\right) & 0.2 \leq U < U_d \\ \arctan\left(\frac{1.5 \times (0.9 - U)}{\sqrt{1.5^2 - [1.5 \times (0.9 - U)]^2}}\right) & U_d \leq U < 0.7 \\ \arctan(1.5 \times (0.9 - U)U) & 0.7 \leq U < 0.9 \\ 0^\circ & 0.9 \leq U \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$A = L_r(L_s L_r - L_m^2)[1/\tau_{rc}^2 + (\omega_1 - \omega_r)^2] - R_{rc} L_m^2 / \tau_{rc} \quad (8)$$

式中: I_{DFIG} 为 DFIG 的短路电流幅值; $I_{\text{N(DFIG)}}$ 为 DFIG 机组的额定电流; θ_{DFIG} 为 DFIG 机端电压与短路电流之间的相角差。

1.3 电网短路时 PV 机端电压-短路电流的幅相映射建模

PV 基于最大功率跟踪模块,经升压电路及变流器接入电网^[24]。按照国家标准光伏电站运行规程^[25],同样可得出 PV 机端电压-短路电流的幅相映射为:

$$I_{\text{PV}} = \begin{cases} 1.5 I_{\text{N(PV)}} & 0 \leq U < 0.7 \\ I_{\text{N(PV)}} \sqrt{[1.5 \times (0.9 - U)]^2 + (1/U)^2} & 0.7 \leq U < 0.9 \\ I_{\text{N(PV)}}/U & 0.9 \leq U \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$\theta_{PV} = \begin{cases} \arctan\left(\frac{1.05}{\sqrt{1.5^2 - 1.05^2}}\right) = 44.5^\circ & 0 \leq U < 0.2 \\ \arctan\left(\frac{1.5 \times (0.9 - U)}{\sqrt{1.5^2 - [1.5 \times (0.9 - U)]^2}}\right) & 0.2 \leq U < 0.7 \\ \arctan(1.5 \times (0.9 - U)U) & 0.7 \leq U < 0.9 \\ 0^\circ & 0.9 \leq U \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: I_{PV} 为 PV 的短路电流幅值; $I_{N(PV)}$ 为 PV 机组的额定电流; θ_{PV} 为 PV 机端电压与短路电流之间的相角差。

2 计及机-网间电气元件的改进工程化电网短路电流计算方法

2.1 新能源机端短路电流幅相映射的工程化处理

第 1 章所建模型按照机端电压跌落分段后的每一段基本都是非线性的,且在 DFIG 映射模型中包含机组的实际运行参数值,例如,其 Crowbar 投入的机端电压 U_d 与式(6)中相关参数设置有关,这 2 个主要原因将导致该模型难以应用于实际工程。因此,必须对该模型进行工程化处理,开展线性近似化和参数实用化。

模型线性化的依据在于,按式(3)、式(4)、式(6)、式(7)、式(9)、式(10)所绘制的折线在每一段上的曲率均较小,因此可用直线替换曲线以降低工程计算量。模型参数实用化则是采用文献[26]中 DFIG 的典型参数拟合得出其机端特性,在工程应用层面上满足实际需求。

对于 3 种新能源机组, PMSG 工程化后的线性模型为:

$$\begin{cases} I_{PMSG} = \begin{cases} 1.5I_{N(PMSG)} & 0.2 \leq U < 0.7 \\ (-5U/3 + 8/3)I_{N(PMSG)} & 0.7 \leq U \leq 1 \end{cases} \\ \theta_{PMSG} = \begin{cases} 63.57^\circ \times (0.9 - U) & 0.2 \leq U < 0.9 \\ 0^\circ & 0.9 \leq U \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

DFIG 工程化后的线性模型为:

$$\begin{cases} I_{DFIG} = \begin{cases} 2.94U I_{N(DFIG)} & 0.2 \leq U < 0.51 \\ 1.5I_{N(DFIG)} & 0.51 \leq U < 0.7 \\ (-5U/3 + 8/3)I_{N(DFIG)} & 0.7 \leq U \leq 1 \end{cases} \\ \theta_{DFIG} = \begin{cases} -82^\circ & 0.2 \leq U < 0.51 \\ 63.57^\circ \times (0.9 - U) & 0.51 \leq U < 0.9 \\ 0^\circ & 0.9 \leq U \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

PV 工程化后的线性模型为:

$$\begin{cases} I_{PV} = \begin{cases} 1.5I_{N(PV)} & 0 \leq U < 0.7 \\ (-5U/3 + 8/3)I_{N(PV)} & 0.7 \leq U \leq 1 \end{cases} \\ \theta_{PV} = \begin{cases} 44.5^\circ & 0 \leq U < 0.2 \\ 63.57^\circ \times (0.9 - U) & 0.2 \leq U < 0.9 \\ 0^\circ & 0.9 \leq U \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

上述线性化过程固然加快了计算速度,模型更具有工程价值,但直线替代曲线也导致计算精度略微降低,实际工程中可以根据需求折衷选择。

2.2 新能源机端至并网点短路电流映射模型的迭代推导方法

通过 2.1 节处理过程可得新能源机端的工程化模型,但正如引言中所述,实际工程中大部分新能源机组并网须通过箱变、集电线路、主变及送出线路等机-网间的电气元件,具体结构见图 1,所以文献[17]中将新能源机端电压视作并网点电压的研究方法存在严重缺陷。文中为弥补上述缺陷并提高模型的实际应用价值,拟从新能源机端逆推得到并网点的工程化模型。

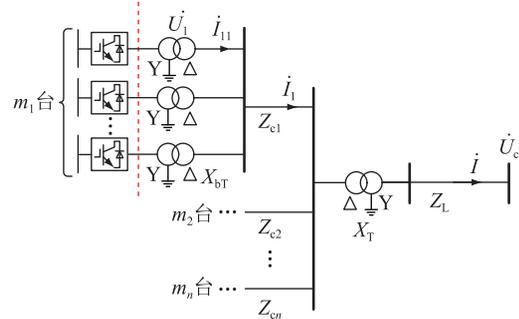


图 1 新能源场站并网结构

Fig.1 New energy station grid-connected structure

电网内部某母线节点发生三相对称短路时,设新能源并网点电压为 \dot{U}_c ,由于同一场站内新能源机组和箱变的型号及参数一般是相同的,可认为每条集电线路所接新能源机端的电压一致,设其为 $\dot{U}_i (i=1, 2, \dots, n)$,相应输出电流也一致。 n 条集电线路各接有 m_1, m_2, \dots, m_n 台新能源机组,每条集电线路、送出线路的阻抗分别为 $Z_{ci} (i=1, 2, \dots, n)$ 、 Z_L ;箱变、主变折算到高压侧的电抗分别为 X_{bT} 、 X_T 。第 i 条集电线路所接第 j 台 ($j=1, 2, \dots, m_i$) 新能源机端的输出电流为 \dot{I}_{ij} ;第 i 条集电线路电流为 \dot{I}_i , $\dot{I}_i = \sum_{j=1}^{m_i} \dot{I}_{ij}$;送出线路上流过的电流(即干线电流)为 \dot{I} 。简便起见,在构建新能源并网点短路电流的迭代计算过程中忽略送出线路的对地电容。

与同步机电源相比,新能源机组在电网故障时馈出的短路电流数值并不大^[21](远小于同步机电源的短路电流),因此在各集电线路、主变及箱变上的短路压降并不大。为从新能源机端逆推得到并网点电压-电流映射关系,可采用如下迭代算法:首先假设 $\dot{U}_i = \dot{U}_c$ 作为初始条件,将其代入前文所得新能源机端工程化模型中,可得每条集电线路所接新能源机端电流 \dot{I}_{ij} ,再根据式(14)可更新 \dot{U}_i 。

$$\begin{aligned} \dot{U}_i &= \dot{U}_c + j\alpha_1\alpha_2(Z_L + X_T) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \frac{\dot{I}_{ij}}{\alpha_1\alpha_2k_1^2k_2^2} + \\ &jZ_{ci} \sum_{j=1}^{m_i} \dot{I}_{ij} + j\alpha_2X_{BT} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{\dot{I}_{ij}}{\alpha_2k_2^2} = \\ &\dot{U}_c + j(Z_L + X_T) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \frac{\dot{I}_{ij}}{k_1^2k_2^2} + \\ &jZ_{ci} \sum_{j=1}^{m_i} \dot{I}_{ij} + jX_{BT} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{\dot{I}_{ij}}{k_2^2} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: k_1 、 k_2 分别为主变及箱变变比; α_1 、 α_2 分别为主变和箱变导致的相移,其与变压器接法及故障类型有关。在研究电网三相短路的前提下,电流和电压经过变压器所产生的相移相同。

将上述所得 \dot{U}_i 代入新能源机端工程化模型中,进入下一轮迭代,进一步更新各集电线路电流 \dot{I}_i 。结合式(14)及工程化模型多次迭代直至满足式(15)所示迭代终止条件,最终记录迭代收敛后的送出线路电流 \dot{I} 的幅值和相角。

$$(|I_{k+1} - I_k|/I_k < \varepsilon) \parallel (k > k_0) \quad (15)$$

式中: I_k 为第 k 轮迭代过程中送出线路的电流幅值; ε 为迭代收敛精度,应按照实际工程需求选取,其值不可太大,否则将直接跳出迭代过程,也不可太小,否则每次迭代都会因达到迭代轮数上限而结束, ε 的选取将失去意义; k 为迭代轮数; k_0 为设定的迭代轮数上限,参照文献[17]一般取 10 即可。

上述迭代过程简述了针对某一给定并网点电压 \dot{U}_c 求得对应 \dot{I} 的方法。为进一步获得并网点的工程化模型,可设定 $\dot{U}_c = U_c \angle 0^\circ$,而后遍历 $U_c \in (0,1)$ (按照实际精度需求设定步长),再通过迭代计算求得每一步长中 U_c 对应的 \dot{I} ,即可得出 U_c 与 \dot{I} 之间的映射关系。最终,可根据实际需求对迭代所得映射关系进行二次工程线性化处理。

2.3 含新能源电网的改进局部迭代短路电流计算方法

文献[17]提出了含新能源电网短路电流的局

部迭代计算方法,各步骤主要可概述为:

(1) 忽略全网新能源,通过潮流计算及传统短路电流计算求取故障前后电网各节点电压。

(2) 划分迭代区域,将节点电压跌落程度小于某一设定值的节点归入故障节点集。

(3) 在故障节点集中按照求取的新能源短路电流映射模型进行迭代计算,直至满足收敛条件或达到设定的迭代轮数上限。

(4) 利用迭代计算结果求取全网的短路电流。

参照以上计算理论,文中改进之处可描述为:利用步骤(1)中计算所得的故障后电网各节点电压的幅值和相角,通过所提新能源并网点机端电压-短路电流的幅值和相位映射关系,在步骤(3)中进行局部迭代。考虑相位映射关系使得计算过程更为精细合理,新能源机端逆推至并网点这一过程也具有一定的实际意义。综上,文中所提含新能源电网的改进短路电流计算方法流程见图 2。

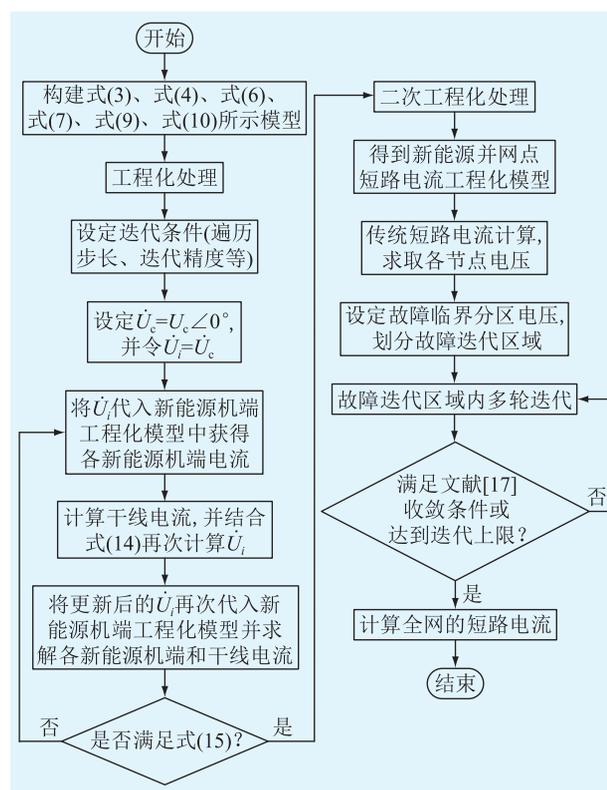


图 2 含新能源电网的改进短路电流计算方法流程

Fig.2 Flow chart of improved short-circuit current calculation method of power grid with new energy sources

3 仿真验证

3.1 新能源机端电压-短路电流幅相映射模型

为验证第 1 章中新能源机端电压-短路电流幅相映射模型的准确性,在 PSCAD 仿真软件中搭建如图 3 所示的简易电网模型。该模型中参数设置为:

同步机大电网端口电压为 121 kV;线路 1、2、3 阻抗参数均为 $0.1+j0.4 \Omega/\text{km}$;线路 1、3 长度之和为 16 km;线路 2 长度为 1 km;负荷大小为 $120+j60 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。新能源支路变压器为理想变压器, Dyn 接线, 其变比及额定容量分别为 $38.5 \text{ kV}/121 \text{ kV}$ 、 $150 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。新能源机组参数可参考文献[26]。

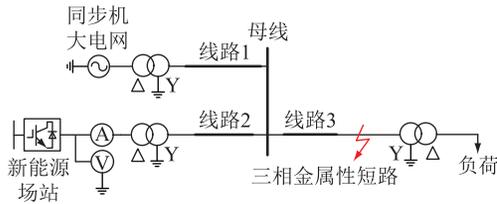


图3 含新能源接入的简易电网模型

Fig.3 Simple grid model with new energy sources access

在线路 3 上设置三相金属性短路故障,并控制线路 1、3 长度总和不变,可实现同步机大电网馈出恒定短路电流;再通过改变线路 1、3 的长度比例,以实现新能源出口电压的不同程度跌落。多次记录新能源机端电压及电流的幅值和相角,可分别得到 PMSG、DFIG、PV 3 种新能源机端电压-短路电流幅相映射的仿真结果。

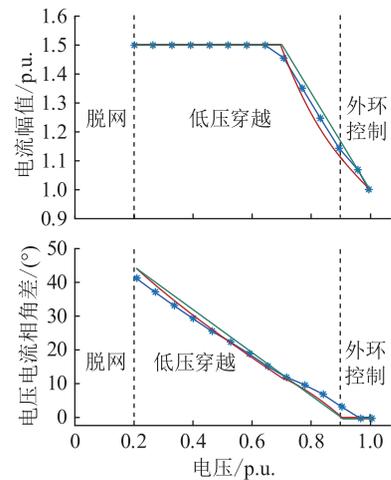
进一步地,将通过上述方式所得的机端特性(以下称为仿真拟合模型)与式(3)、式(4)、式(6)、式(7)、式(9)、式(10)所表示的机端特性(以下称为理论计算模型)进行对比,结果见图 4。分析可知,仿真拟合模型与理论分析模型吻合程度较高,即仿真进一步验证了理论计算模型的准确性。

最后,按照第 2 章所述方法进行工程线性化处理,即采用分段折线形式(以下称为实用计算模型)代替已有的非线性理论计算模型。3 种新能源的仿真拟合模型、理论计算模型以及实用计算模型的对比结果如图 4 所示。

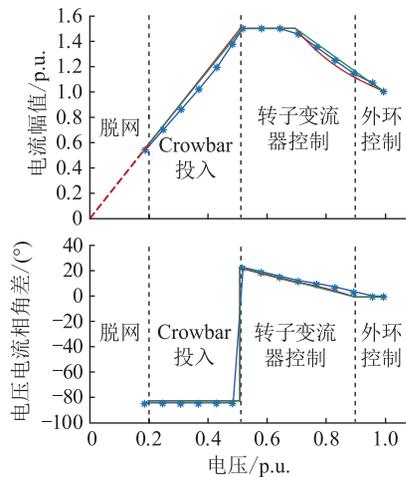
3.2 并网电压-短路电流幅相映射模型验证

结合图 1 所示模型验证第 2 章中新能源并网电压-电流映射关系的迭代求取理论方法,不失一般性地将模型设置如下:新能源机组类型为 PV 机组,送出线路长度为 10 km,2 条集电线路长度分别为 0.2 km 和 0.4 km,线路阻抗均为 $0.1+j0.4 \Omega/\text{km}$,2 条集电电路上分别接有 PV 机组 1 台和 2 台,主变及箱变折算到高压侧阻抗大小分别为 5.28Ω 、 41.4Ω 。迭代求取方法的设置如下: U_c 的遍历步长为 0.1,收敛精度 ε 为 0.1%,迭代轮数上限 k_0 为 10。在 Matlab 软件中,使用第 2 章所述方法,可逐点迭代获得并网点电流幅值、电压电流相角差的理论计算值。

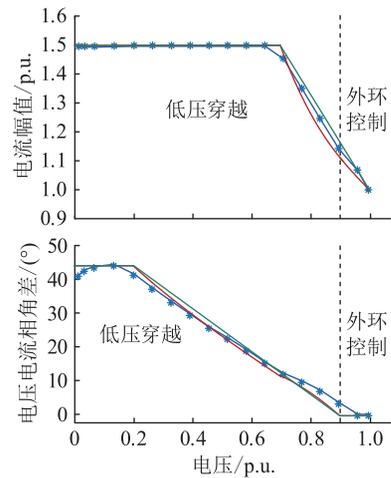
为进一步验证上述理论计算值的精确性,在



(a) PMSG映射模型



(b) DFIG映射模型



(c) PV映射模型

—●— 仿真拟合值 ——— 理论计算值 ——— 实用计算值

图4 仿真拟合模型、理论计算模型、实用计算模型的对比

Fig.4 Comparison of simulation fitting model, theoretical calculation model and practical calculation model

PSCAD 中将图 1 所示模型(模型设置同理论计算)接入图 3 所示模型中的新能源并网点,同样通过逐次改变线路 1、3 的长度比例调节并网点电压的跌落程度,并记录对应的并网点电流幅值及电压电流相角差。最后,将 PSCAD 仿真结果与 Matlab 理论计

算结果绘入同一坐标系,如图 5 所示。由图 5 对比分析可知,并网点电流幅值、电压电流相角差的理论计算结果与仿真结果吻合程度较高,验证了理论计算结果的准确性。

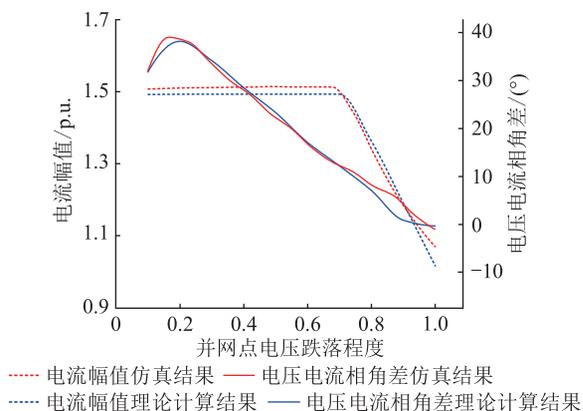


图 5 并网点幅相映射关系的理论、仿真结果对比

Fig.5 Comparison of theoretical and simulation results of amplitude-phase mapping at the point of coupling

3.3 改进的含新能源电网短路电流计算方法验证

将所得改进的新能源并网点幅相映射模型应用于大电网级短路电流计算,对所提改进方法的有效性和精确度进行相应验证。为此,在 PSCAD 软件中搭建如图 6 所示的 IEEE 39 节点系统模型。出于简便性考虑,将 3.2 节中新能源并网系统模型分别接入节点 18、15、12、24 所在母线,分别为 PV1、PV2、PV3、PV4,并设置在节点 16 处发生三相对称接地故障。

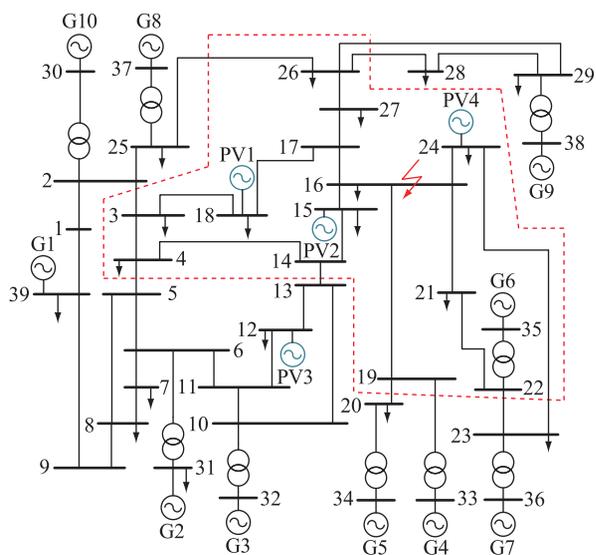


图 6 IEEE 39 节点系统结构

Fig.6 Structure of IEEE 39-node system

分别编写 3.2 节中新能源并网系统短路电流的幅相映射模型和文献[17]中映射模型,并封装成可调用函数包,再结合 Matlab 短路电流计算程序,与

PSCAD 软件进行相同的条件设置,开展短路电流计算。

按照文献[17]中的方法,文中设置故障分区临界电压为 0.5,可求得相应的故障迭代区域,如图 6 中红色虚线框内所示。由于 39 节点系统的节点及支路数量较多,文中仅展示故障区域内部分典型线路及新能源送出线路的短路电流计算结果,并求出其与 PSCAD 仿真结果间的百分比误差。以节点 p —节点 z 表示线路编号,详细结果见表 1。

表 1 故障区域内部分线路短路电流求解结果

Table 1 Solution results of short-circuit current of some lines in the fault area

线路编号	PSCAD 仿真结果/kA	改进前算法		改进算法	
		结果/kA	误差/%	结果/kA	误差/%
3—18	11.52	12.35	7.20	11.36	1.39
PV1 送出线	1.42	1.50	5.63	1.48	4.23
17—18	12.87	12.65	1.71	12.83	0.31
16—17	22.08	22.73	2.94	22.35	1.22
16—24	10.52	9.26	11.98	10.09	4.09
PV4 送出线	1.41	1.50	6.38	1.48	4.96
15—16	14.72	13.95	5.23	14.48	1.63
PV2 送出线	1.36	1.50	10.29	1.48	8.82
4—14	4.15	4.68	12.77	4.19	0.96

由表 1 可知,与 PSCAD 仿真结果比较,改进短路电流算法相较于改进前,不论新能源送出线路还是电网中的输电线路,其计算结果精度都有较大程度的提升,基本能控制计算误差在 5% 以内。同时须说明的是,由于节点 12 故障跌落电压为 0.72 倍额定电压,超过 0.5 较多,因此未进入局部迭代区域。当然,这只是一种巧合,若在大规模电网短路电流计算中,有少量新能源在迭代区域外的附近,可考虑对故障分区临界电压重新寻优,尽可能将在外的新能源包含在迭代区域内,进一步提升短路电流计算精度,具体寻优方法尚待后续研究。上述结果充分验证了计及新能源短路电流相位映射以及机-网间电气元件对于短路电流计算精度的提升效果。

3.4 改进短路电流计算方法耗时的定量分析

文中所提短路电流计算方法主要针对现有局部迭代理论的映射模型进行改进,增加了从新能源机端到并网点的幅相映射模型的推导过程,文中对这一过程的耗时进行说明。

以 3.2 节中的迭代过程为例,设置 U_c 的遍历步长为 0.1,则主要进行 10 次迭代计算,每次迭代计算中须各经过 9、7、6、6、6、4、6、6、6 轮才能保证式

(15)得到收敛。从 Matlab 代码运行结果出发,迭代精度 ε 达到 0.1%,但总耗时不过数十毫秒。当然,这是针对 3.2 节的仿真场景而言,该场景下仅设置了 3 台 PV 机组,而实际大型新能源场站中机组台数往往超过 50 台。表 2 为不同数量新能源机组接入、不同遍历步长场景下进行仿真的耗时,新能源机组仍按照 3.2 节接入大电网,设定每条集电电路上接有的机组数量相同。由表 2 可知,新能源机组数量增加和遍历步长调小后,获得新能源并网点短路电流-并网点电压幅相映射的这一过程迭代耗时仍然较短。

表 2 不同仿真场景下的迭代耗时

Table 2 Iteration time in different simulation scenarios

新能源机组数量	遍历步长	迭代耗时/s
20	0.10	2.055
50	0.10	12.132
50	0.05	18.167
50	0.01	28.425
80	0.10	26.794

除此以外,短路电流局部迭代方法在计算速度方面的优势已在文献[17]中得到充分证明。所以,文中方法在满足在线应用的同时,一定程度上可进一步提升计算精度。

4 结语

文中在含新能源电网的局部迭代短路电流计算方法的研究基础上,补充构建了新能源端口电压-短路电流的相位映射模型;在计及箱变、集电线路、主变及送出线路等机-网间电气元件的影响后,提出一种将端口短路电流幅相映射逆推至并网点的迭代计算方法。然后,在 PSCAD 中搭建新能源并网模型验证了上述相位映射模型和迭代计算方法的准确性,并将所得并网点映射模型应用于 IEEE 39 节点系统中,结果表明所提方法能在一定程度上提升短路电流计算精度。此外,文中对所提方法的计算耗时进行了定量分析,得出了其具有在线应用价值的结论。

参考文献:

[1] 贾科,杨哲,朱正轩,等. 基于电流幅值比的逆变型新能源场站送出线路 T 接纵联保护[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):82-88.
JIA Ke, YANG Zhe, ZHU Zhengxuan, et al. Pilot protection based on current amplitude ratio for teed line in inverter-interfaced renewable energy power plants[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):82-88.

[2] FANG Y, JIA K, YANG Z, et al. Impact of inverter-interfaced

renewable energy generators on distance protection and an improved scheme[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2019,66(9):7078-7088.

- [3] 简学之,刘子俊,霍永胜,等. 计及风机短路电流偏移特性的配电网阻抗幅值差动保护方法[J]. 电网与清洁能源,2022,38(8):121-129.
JIAN Xuezhi, LIU Zijun, HUO Yongsheng, et al. An impedance amplitude differential protection method of distribution networks considering short-circuit current deviation characteristics[J]. Power System and Clean Energy,2022,38(8):121-129.
- [4] 韩伟,刘素梅,肖超,等. 计及发电单元故障特性差异的光伏电站短路电流计算模型[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(20):129-135.
HAN Wei, LIU Sumei, XIAO Chao, et al. Steady short-circuit calculation model for a photovoltaic station considering different generation units' fault characteristics[J]. Power System Protection and Control,2021,49(20):129-135.
- [5] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(9):171-191.
- [6] 金基达,范春菊,郭雅蓉,等. 考虑分布式逆变电源特性的距离 II 段自适应保护整定方案[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(23):41-50.
JIN Shenda, FAN Chunju, GUO Yarong, et al. Adaptive distance section II protection setting scheme considering the characteristics of an inverter-interfaced distributed generator[J]. Power System Protection and Control,2022,50(23):41-50.
- [7] 张勇军,羿应棋,李立涅,等. 双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J]. 电力系统自动化,2022,46(22):1-12.
ZHANG Yongjun, YI Yingqi, LI Licheng, et al. Prospect of new low-voltage distribution system technology driven by carbon emission peak and carbon neutrality targets[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(22):1-12.
- [8] 杨杉,同向前,刘健,等. 含分布式电源配电网的短路电流计算方法研究[J]. 电网技术,2015,39(7):1977-1982.
YANG Shan, TONG Xiangqian, LIU Jian, et al. Short-circuit current calculation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology,2015,39(7):1977-1982.
- [9] JIA J D, YANG G Y, NIELSEN A H, et al. Impact of VSC control strategies and incorporation of synchronous condensers on distance protection under unbalanced faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,66(2):1108-1118.
- [10] 匡晓云,方煜,关红兵,等. 适用于含新能源逆变电源网络的全时域短路电流计算方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):113-122.
KUANG Xiaoyun, FANG Yu, GUAN Hongbing, et al. Full-time domain short circuit current calculation method suitable for

- power network with inverter-interfaced renewable energy source [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40 (5): 113-122.
- [11] 邓成江,李海锋,曾德辉,等. 含逆变型分布式电源的不平衡配电网短路电流计算方法研究[J]. *智慧电力*, 2021, 49 (2): 39-46.
- DENG Chengjiang, LI Haifeng, ZENG Dehui, et al. Calculation method of short-circuit current in unbalanced distribution network with Inverter-based distributed generation[J]. *Smart Power*, 2021, 49(2): 39-46.
- [12] 刘慧媛,肖繁,张哲,等. 新能源电源接入不平衡配电网的短路计算方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(21): 177-186.
- LIU Huiyuan, XIAO Fan, ZHANG Zhe, et al. Short-circuit calculation method for unbalanced distribution network with integration of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(21): 177-186.
- [13] 吴成国,肖仕武. 高比例分布式电源接入电网短路电流的拟牛顿迭代计算方法[J]. *电网技术*, 2022, 46(12): 4581-4590.
- WU Chengguo, XIAO Shiwu. Quasi-Newton iterative calculation method for short circuit current of high proportion distributed generation connected to power grid[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(12): 4581-4590.
- [14] 王增平,杨国生,汤涌,等. 基于特征影响因子和改进 BP 算法的直驱风机风电场建模方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(9): 2604-2615.
- WANG Zengping, YANG Guosheng, TANG Yong, et al. Modeling method of direct-driven wind generators wind farm based on feature influence factors and improved BP algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(9): 2604-2615.
- [15] 贾科,孔繁哲,张旸,等. 基于改进 K-均值算法的双馈风场故障等值建模方法[J/OL]. *电网技术*: 1-12 [2022-10-20]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1463>.
- JIA Ke, KONG Fanzhe, ZHANG Yang, et al. Fault equivalent modeling method of doubly fed wind farm based on improved K-means algorithm [J/OL]. *Power System Technology*: 1-12 [2022-10-20]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1463>.
- [16] 贾科,顾晨杰,毕天姝,等. 大型光伏电站汇集系统的故障特性及其线路保护[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(9): 189-198.
- JIA Ke, GU Chenjie, BI Tianshu, et al. Fault characteristics and line protection within the collection system of a large-scale photovoltaic power plant [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(9): 189-198.
- [17] 贾科,侯来运,毕天姝,等. 基于故障区域局部迭代的工程实用化新能源短路电流计算[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(13): 151-158.
- JIA Ke, HOU Laiyun, BI Tianshu, et al. Practical engineering calculation of short-circuit current for renewable energy based on local iteration of fault area[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(13): 151-158.
- [18] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第 1 部分:陆上风电:GB/T 19963.1—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for connecting wind farm to power system—part 1: on shore wind power: GB/T 19963. 1-2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [19] 张凡,牟龙华,王子豪,等. 主从控制孤岛微电网的优化故障控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(4): 1241-1248, 1414.
- ZHANG Fan, MU Longhua, WANG Zihao, et al. Optimal fault control strategy of master-slave controlled islanding microgrid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(4): 1241-1248, 1414.
- [20] 金基达,宋依群,范春菊,等. 考虑逆变电源控制策略的电流保护整定计算[J]. *电网技术*, 2021, 45(9): 3690-3699.
- JIN Shenda, SONG Yiqun, FAN Chunju, et al. Calculation of current protection setting based on inverter generation control strategy[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(9): 3690-3699.
- [21] 杨国生,王增平,欧阳金鑫,等. 考虑低电压穿越全过程的双馈风电机组短路电流计算方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(7): 2185-2193.
- YANG Guosheng, WANG Zengping, OUYANG Jinxin, et al. Short-circuit current calculation method of DFIGWT considering entire LVRT process[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(7): 2185-2193.
- [22] 郭岳霖,买买提热依木·阿布力孜,刘谨言,等. 定子侧变阻值 Crowbar 的 DFIG 高电压穿越技术[J]. *智慧电力*, 2022, 50(11): 90-96.
- GUO Yuelin, MAIMAITIREYIMU Abulizi, LIU Jinyan, et al. DFIG high voltage ride through technology of stator side variable resistance Crowbar[J]. *Smart Power*, 2022, 50(11): 90-96.
- [23] 谭爱国,吴颖颖,王传启,等. 基于保障低压穿越能力的风电机组撬棒自适应投切策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(18): 98-109.
- TAN Aiguo, WU Yingying, WANG Chuanqi, et al. Adaptive switching strategy for a wind turbine Crowbar based on the guarantee of low voltage ride-through capability [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(18): 98-109.
- [24] 田艳军,官仕卿,王毅,等. 光伏直流汇集系统中母线开关电容稳压控制及短路电流抑制[J]. *高电压技术*, 2022, 48(4): 1375-1384.
- TIAN Yanjun, GUAN Shiqing, WANG Yi, et al. Voltage stabilization control and short circuit current suppression of switching capacitor in photovoltaic DC collection system[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(4): 1375-1384.
- [25] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 光

伏发电站接入电力系统技术规定:GB/T 19964—2012[S].
北京:中国标准出版社,2013.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964-2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.

- [26] 贾科,郑黎明,毕天姝,等. 基于余弦相似度的风电场送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报,2019,39(21):6263-6275.

JIA Ke, ZHENG Liming, BI Tianshu, et al. Pilot protection

based on cosine similarity for transmission line connected to wind farms[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(21):6263-6275.

作者简介:



乔立

乔立(1988),男,硕士,高级工程师,从事短路电流控制、大电网安全稳定分析等工作(E-mail:604178648@qq.com);

黄梓欣(1999),男,硕士在读,研究方向为电力系统继电保护及新能源短路电流计算;

章谋成(1998),男,硕士在读,研究方向为新能源短路电流计算。

A short-circuit current calculation method considering phase characteristics of wind power and photovoltaic and components between new energy units and grid

QIAO Li¹, HUANG Zixin², ZHANG Moucheng³, WEI Fanrong², ZHAO Hongsheng¹, LIU Ju¹

(1. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. Economic Research Institute, Wuhan 430074, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 3. College of Electrical

Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: A large number of new energy units represented by wind power and photovoltaics are connected to the grid, making accurate calculation and verification of short-circuit current difficult. Given the phase mapping and the influence of electrical components (components between new energy units and grid) from the unit port to the grid-connected point, such as box transformer, collecting line, main transformer and transmission line are not considered when constructing the short-circuit current mapping model of new energy grid-connected point in the latest researches, an improved engineering grid short-circuit current calculation method that takes into account the phase characteristics of new energy sources and the influence of components between new energy units and grid is proposed. Firstly, combined with the national operation regulations, a supplementary theoretical modeling of the port voltage to short-circuit current phase mapping of new energy units is proposed. Secondly, the model is processed by engineering, and an iterative calculation method is proposed to extrapolate the obtained mapping back to the point of coupling. Then, the engineered short-circuit current amplitude-phase mapping model is applied to the existing local iterative calculation to obtain an improved calculation method. Finally, the new energy grid-connected model is built in the PSCAD simulation software to verify the accuracy of amplitude-phase mapping theory of new energy unit port voltage to short-circuit current and the effectiveness of iterative calculation theory of extra polating the unit port mapping model back to the point of coupling. On this basis, the mapping model is further verified by experiments in IEEE 39-node system. The results show that the proposed improved calculation method can improve the calculation accuracy of short-circuit current to a certain extent.

Keywords: engineering iteration; wind power and photovoltaic units; new energy source; short-circuit current calculation; accuracy improvement; components between new energy units and grid; amplitude-phase mapping

(编辑 陆海霞)