

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241715

考虑大规模多类型馈入源的配电网三相短路故障 稳态电流实用计算方法

李祺平¹, 李保宏¹, 张英敏¹, 江琴¹, 王曦², 陈亮³

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610095;
3. 国网四川省电力公司眉山供电公司, 四川 眉山 610058)

摘要: 随着大规模新能源场站和感应电动机等馈入源接入配电网, 其对配电网短路电流特性的影响日益显著。现有的短路电流计算方法难以准确反映二者共同作用下的短路电流特性, 因此提出了一种大规模多类型馈入源的配电网三相短路故障稳态电流计算方法。该方法首先对故障期间感应电动机馈入的三相短路电流进行波形拟合, 进而建立配电网详细模型与等值模型之间的等效关系。其次通过仿真验证表明等值模型在稳态和暂态特性上与详细模型具有较高的一致性。最后在新能源场站和感应电动机大规模接入配电网的情况下, 将新能源场站与配电网等值模型统一等效为压控电流源来计算三相短路故障稳态电流。仿真结果表明, 该方法具有较高的计算精度和工程实用性。

关键词: 新能源场站; 感应电动机; 波形拟合; 压控电流源; 故障稳态电流

A practical method for steady-state current calculation of three-phase short-circuit faults in distribution networks considering large-scale multi-type feeding sources

LI Qiping¹, LI Baohong¹, ZHANG Yingmin¹, JIANG Qin¹, WANG Xi², CHEN Liang³

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Electric Power Science Research Institute, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610095, China; 3. Meishan Power Supply Company, State Grid Sichuan Electric Power Company, Meishan 610058, China)

Abstract: With the large-scale integration of new energy stations and induction motors into distribution networks, their impact on the short-circuit current characteristics of the network has become increasingly significant. Existing short-circuit current calculation methods are difficult to accurately reflect the combined effects of these diverse feeding sources. Therefore, this paper proposes a steady-state current calculation method for three-phase short-circuit faults in distribution networks with large-scale multi-type feeding sources. First, the waveform of the three-phase short-circuit current fed by induction motors during faults is fitted through waveform modelling, and an equivalent relationship is established between a detailed distribution network model and its equivalent model. Then, simulation results verify that the equivalent model has high consistency with the detailed model in both steady-state and transient characteristics. Finally, under conditions of large-scale integration of new energy stations and induction motors, the equivalent models of new energy stations and distribution networks are jointly represented as voltage-controlled current sources for calculating the steady-state current of three-phase short-circuit faults. Simulation results show that the proposed method has high computational accuracy and strong engineering practicality.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2025NSFSC2037).

Key words: new energy station; induction motor; waveform fitting; voltage-controlled current source; fault steady-state current

0 引言

随着社会经济的发展, 能源在社会中的重要性

不断提升。为了减少化石能源带来的环境污染问题, 国家提出了开发和利用分布式能源的政策和措施^[1]。以风光为代表的分布式新能源大规模接入配电网, 会对配电网的生产安全、电能质量以及稳定性等多方面造成影响^[2-4]。在稳定性方面, 新能源的接入会

基金项目: 四川省自然科学基金项目资助(2025NSFSC2037)

改变配电网的短路电流特性, 进而增加故障分析的复杂性。与此同时, 随着国家工业化水平不断提升, 大量感应电动机接入配电网, 也会对短路电流特性产生重要影响。感应电动机作为配电网中重要的短路电流贡献源, 其现行基于 IEC 标准的短路电流计算方法虽具有完善的理论基础, 但通常要求全电压等级建模, 难以适应我国中高压母线普遍采用的等效建模方式, 因而在实际工程应用中存在一定局限性。

现阶段已有大量文献研究新能源接入配电网短路电流计算方法。其中常见计算新能源故障稳态电流的方法是将新能源等值为恒流源^[5]或非线性受控源^[6]。文献[7]采用历史数据对等效压控电流源的非线性函数进行拟合, 此方法适用于多类型逆变电源的网络, 但是普适性差。文献[8]采用单机倍乘法计算新能源场站短路电流, 该方法较简单但计算精确度不高。文献[9]在文献[8]基础上考虑电气距离和有功出力的影响, 提出了考虑发电单元分布特性的改进单机倍乘法, 此方法具有较高的实用性。文献[10]将风机机组电压和有功出力作为算法坐标, 提出了基于改进 K -均值聚类算法的双馈风电场故障稳态模型, 该方法精确度较高, 但是工程实用价值较低。文献[11]提出了基于暂态运行控制模式差异性的发电单元分群方法, 建立了场站短路电流计算模型, 但是分群方法迭代计算复杂。

目前, 针对配电网感应电动机馈入短路电流的计算方法已有大量研究。时域仿真^[12]和物理建模是获得感应电动机反馈电流的传统方法。现阶段, 文献[13]采用电压源等值模型推导感应电动机反馈短路电流的解析表达式, 但未考虑感应电动机电磁暂态特性。文献[14]通过试验验证了饱和效应会影响感应电动机馈入短路电流的计算, 但是缺乏相关理论分析。文献[15]提出了配电网感应电动机馈入短路电流的对称分量迭代算法, 但没有考虑感应电动机转速变化, 导致短路电流故障稳态误差较大。文献[16]通过求解感应电动机定转子磁链向量, 提出了计及感应电动机转速变化电压跌落时的感应电动机馈入短路电流的计算方法。文献[17]通过对感应电动机馈入配电网的三相短路电流波形进行拟合, 分析等值模型电气参数对配电网短路电流的影响, 但是该方法缺乏理论支撑。

综上所述, 现有研究未考虑大规模新能源与感应电动机同时接入对短路电流的影响。在此场景下, 配电网与新能源场站构成的源-荷系统具有功率流向和端电压的不确定性, 这会导致短路电流特性发生变化^[18-21]。因此, 本文提出了一种考虑多类型馈入源的配电网三相短路故障稳态电流计算方法。本

文在文献[17]的基础上, 通过理论分析拟合感应电动机短路电流波形, 建立适用于中高压母线的等值模型, 该等值模型能够准确反映配电网三相短路特性。在此基础上, 进一步将其与新能源场站模型相结合, 推导出联合系统的三相短路故障稳态电流计算方法。

1 三相短路电流单体馈入源特性分析

1.1 逆变型电源三相短路电流特性分析

逆变型电源发电单元经过升压变压器并入电网的结构示意图如图 1 所示。

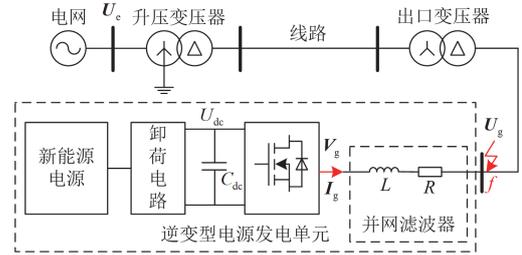


图 1 逆变型电源发电单元并网结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grid-connected structure of inverter power generation unit

图 1 中: U_{dc} 为逆变器直流侧电压; C_{dc} 为直流侧电容; R 、 L 分别为滤波器电阻和电感; V_g 为逆变器交流侧输出电压; I_g 为逆变器交流侧输出电流; U_g 为发电单元接入出口变压器处的电压; U_g 为升压变压器并入电网处的电压。在电网发生短路故障时, 逆变器会根据低电压穿越策略输出有功、无功电流指令值, 逆变型电源低电压穿越策略如式(1)所示^[22]。

$$i_{dref} = \min \left\{ \sqrt{I_{max}^2 - i_{qref}^2}, \frac{2P}{3U_{g*}U_N} \right\}$$

$$i_{qref} = \begin{cases} 0 & U_{g*} > 0.9 \text{ p.u.} \\ 1.5 \times (0.9 - U_{g*}) & 0.2 \text{ p.u.} \leq U_{g*} \leq 0.9 \text{ p.u.} \\ 1.05I_N & U_{g*} < 0.2 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_{dref} 、 i_{qref} 分别为正序有功电流和无功电流的指令值; I_{max} 为发电单元故障稳态基频电流的限幅值(一般为额定电流的 1.1~2 倍); P 为故障前新能源有功出力; U_{g*} 为发电单元接入出口变压器点的电压标幺值; U_N 为发电单元逆变器交流侧的额定电压; I_N 为发电单元逆变器交流侧的额定电流。

由式(1)可知, 逆变型电源的故障稳态特性受低电压穿越策略影响。当 $U_{g*} > 0.9 \text{ p.u.}$ 时, 逆变型电

源不发无功, 能维持故障前有功功率; 当 U_{g^*} 跌落至 $[0, 0.2]$ p.u. 时, 存在有功功率临界值 P_{1g} , 当故障前有功出力小于 P_{1g} 时, 可维持故障前有功功率, 否则受电流限幅影响有功功率受限; 当 U_{g^*} 跌落至 $[0.2, 0.9]$ p.u. 时, 也存在一个有功功率临界值 P_{2g} , 同理当故障前新能源有功力大于或等于 P_{2g} 时, 逆变器电源有功功率受限^[18], 其中有功功率临界值如式(2)所示。

$$\begin{cases} P_{1g} = \frac{3U_{g^*}U_N}{2} \sqrt{I_{\max}^2 - (1.05I_N)^2} \\ P_{2g} = \frac{3U_{g^*}U_N}{2} \sqrt{I_{\max}^2 - [1.5 \times (0.9 - U_{g^*})I_N]^2} \end{cases} \quad (2)$$

1.2 感应电动机三相金属性短路电流特性分析

图2为鼠笼型感应电动机端口发生三相金属性短路时的等效电路图, 其中 U_s 为定子电压; R_s 、 $X_{s\sigma}$ 、 R_r 、 $X_{r\sigma}$ 、 X_m 分别为定子电阻、定子漏抗、转子电阻、转子漏抗和励磁电抗; s 为感应电动机转差率; I_s 、 I_r 和 I_f 分别为定子电流、转子电流和感应电动机发生三相金属性短路时馈入电网侧的短路电流。

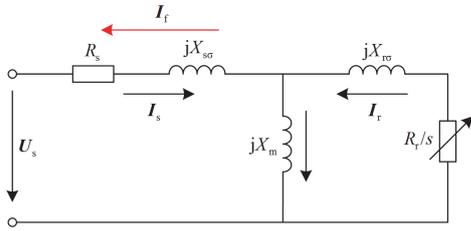


图2 鼠笼型感应电动机端口发生三相金属短路等效电路图
Fig. 2 Equivalent circuit diagram of three-phase metallic short circuit at the port of squirrel cage induction motor

假设短路前感应电动机为空载运行, 此时感应电动机转子旋转角速度 ω_r 近似为同步角速度 ω_1 , 即有 $\omega_r \approx \omega_1$ 。在短路初期由于转子惯性作用, 电动机的转速变化很小, 可以近似认为转速保持不变。当电动机定子端口发生三相短路时, 可以看作在定子端加上一组与原先端电压大小相等、方向相反的三相电压。设短路前定子电压幅值为 U_m , 初相角为 φ_m , 由文献[23]可知感应电动机端口发生三相金属性短路时感应电动机馈入的 a 相短路电流 $I_{fa}(t)$ 为

$$I_{fa}(t) = \frac{U_m}{X'_s} e^{-\alpha t} \cos \varphi_m - U_m \left(\frac{1}{X'_s} - \frac{1}{X_s} \right) e^{-\frac{t}{T'_r}} \cos(\omega_1 t + \varphi_m) \quad (3)$$

式中: X'_s 为转子短路时定子的瞬态电抗, $X'_s = X_{s\sigma} + X_{r\sigma} X_m / (X_{r\sigma} + X_m)$; α 为定子直流分量的衰减系数, $\alpha = \omega_1 R_s / X'_s$; X_s 为同步电抗, $X_s = X_{s\sigma} + X_m$; T'_r 为定子短路时转子的瞬态时间常数, $T'_r = X'_r / (\omega_1 R_r)$, X'_r 为定子短路时转子的瞬态电抗, $X'_r = X_{r\sigma} + X_{s\sigma} X_m / (X_{s\sigma} + X_m)$ 。

由式(3)可知, 感应电动机馈入的短路电流由两部分组成, 一部分是直流分量, 它以定子时间常数 $1/\alpha$ 衰减, 它的幅值取决于相角 φ_m ; 另一部分是交流分量, 它以瞬态时间常数 T'_r 衰减, 并且交流分量频率为转子旋转角速度 ω_r (假设 $\omega_r \approx \omega_1$)。

2 多机新能源场站三相短路电流实用计算

图3给出了新能源场站辐射式混联电气拓扑结构示意图。

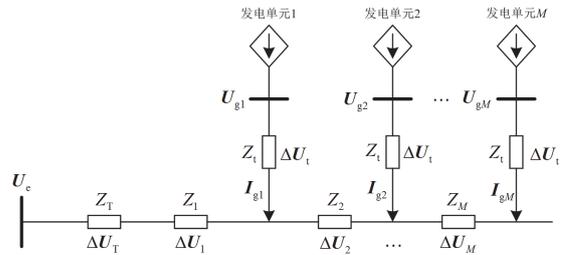


图3 新能源场站辐射式混联电气拓扑结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of radiation hybrid electrical topology structure for new energy station

图3中: Z_1, \dots, Z_M 为各线路段线路阻抗; M 为新能源场站发电单元数量; Z_T 为出口变压器阻抗; Z_T 为升压变压器阻抗; U_{g1}, \dots, U_{gM} 为各发电单元接入点处电压; I_{g1}, \dots, I_{gM} 为各发电单元故障稳态电流; $\Delta U_1, \dots, \Delta U_M$ 为各线路段上的压降; ΔU_T 为出口变压器压降; ΔU_T 为升压变压器压降。

为了方便分析各发电单元短路电流输出情况, 先假设每个发电单元输出的电流幅值和相角都相等, 可得到图4所示各发电单元并联等效结构, 图中各并联等效阻抗的计算公式如式(4)^[24]所示。

$$Z_{eqM} = \frac{\Delta U_T + \Delta U_M + \dots + \Delta U_2 + \Delta U_1 + \Delta U_T}{I_{gM}} \quad (4)$$

$$M(Z_1 + Z_T) + (M-1)Z_2 + \dots + Z_M + Z_T$$

设第 i 个发电单元的有功出力为 P_i , 其相对于并网点的等效阻抗为 Z_{eqi} , 则该场站的平均有功出力 P_{av} 和平均等效阻抗 $Z_{eq,av}$ 为

$$P_{av} = \frac{\sum_{i=1}^M P_i}{M}, Z_{eq,av} = \frac{\sum_{i=1}^M Z_{eqi}}{M} \quad (5)$$

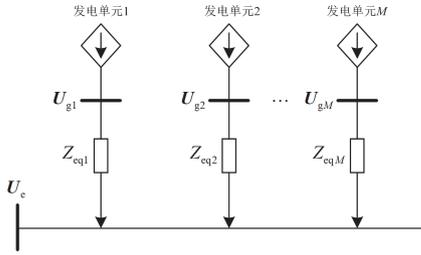


图4 新能源场站等效并联电气拓扑结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of equivalent parallel electrical topology structure of new energy station

由文献[9]可知,根据平均等效阻抗 $Z_{eq,av}$ 、平均有功出力 P_{av} 和并网点电压 U_e 可以估算出发电单元接入点的平均电压相量 $U_{g,av}$ 为

$$U_{g,av} = U_e + I_{g,av} Z_{eq,av} \quad (6)$$

式中: $I_{g,av}$ 为新能源场站平均有功出力根据式(1)对应的短路电流。

由于新能源场站各个发电单元有功出力存在差异,如果采用单机倍乘法会产生较大的误差,所以根据接入点平均电压 $U_{g,av}$ 对场站进行分群来计算短路电流。图5为在单机倍乘法基础上进行改进的新能源场站故障稳态短路电流计算流程^[9]。

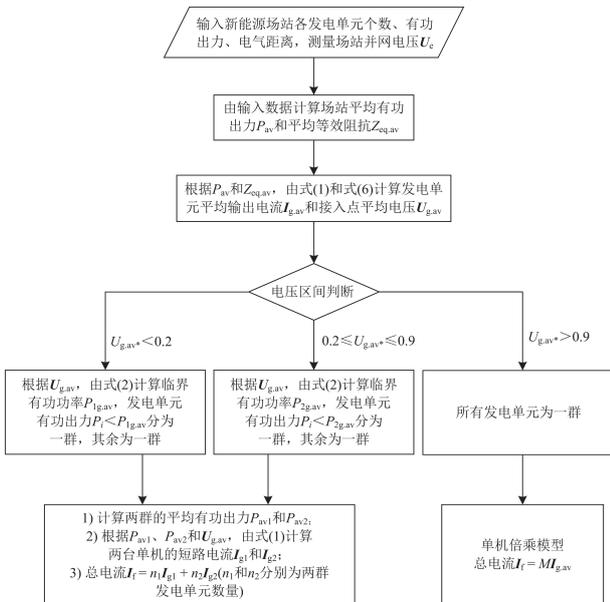


图5 改进的新能源场站故障稳态短路电流计算流程

Fig. 5 Improved steady-state short-circuit current calculation process for faults in new energy stations

3 含大规模感应电机的配电网短路电流计算

3.1 大规模感应电机馈入母线三相短路电流计算

系统母线发生三相金属性短路故障时,第 i 台感应电动机馈入短路点的短路电流 I_{fi} 如图6所示。图中: U 为高压母线电压; l 为配电网长度。

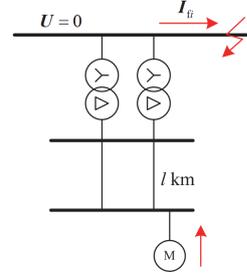


图6 系统母线发生三相金属性短路故障时第 i 台电动机馈入短路电流示意图

Fig. 6 Schematic diagram of short-circuit current fed into the i th motor in system bus due to three-phase metallic short circuit

针对配电网感应电动机辐射式和干线式结构,由文献[25]可知,在不考虑配电网无功补偿的情况下,第 i 台电动机馈入母线短路电流,等效于在电动机定子侧串接一个附加阻抗 Z_i 后,端口发生三相短路电动机馈入的短路电流。

$$Z_i = (R_{Ti} + R_{li}) + j(X_{Ti} + X_{li}) = R_i + jX_i \quad (7)$$

式中: R_{Ti} 为第 i 台电动机与母线间所有变压器电阻归算到母线电压侧的值之和; R_{li} 为第 i 台电动机与母线间所有线路电阻归算到母线电压侧的值之和; X_{Ti} 为第 i 台电动机与母线间所有变压器电抗归算到母线电压侧的值之和; X_{li} 为第 i 台电动机与母线间所有线路电抗归算到母线电压侧的值之和; R_i 为第 i 台电动机与母线间总电阻归算值; X_i 为第 i 台电动机与母线间总电抗归算值。

图7所示为系统母线发生三相短路时,第 i 台感应电动机馈入短路电流的等效电路图。

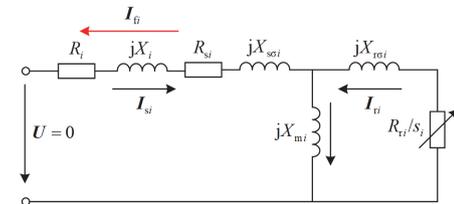


图7 系统母线发生三相短路时第 i 台电动机馈入短路电流等效电路图

Fig. 7 Equivalent circuit diagram of the i th motor feeding short-circuit current when a three-phase short circuit occurs on system bus

系统母线发生三相短路时, 由式(3)可得第 i 台感应电动机馈入母线的 a 相短路电流 $I_{fa}(t)$ 为

$$I_{fa}(t) = \frac{U}{X'_{si}} e^{-\alpha_i t} \cos \varphi - U \left(\frac{1}{X'_{si}} - \frac{1}{X_{si}} \right) e^{-\frac{t}{T'_{ri}}} \cos(\omega_1 t + \varphi) \quad (8)$$

式中: U 和 φ 分别为发生三相短路、母线稳态时的相电压幅值和相位角; X_{si} 相当于第 i 台电动机定子总电抗, $X_{si} = X_{s\sigma i} + X_i + X_{mi}$; X'_{si} 相当于第 i 台电动机转子短路时定子的瞬态电抗, $X'_{si} = X_{s\sigma i} + (X_{r\sigma i} + X_i)X_{mi} / (X_{r\sigma i} + X_i + X_{mi})$; T'_{ri} 相当于第 i 台电动机定子短路时转子的瞬态时间常数, $T'_{ri} = X'_{ri} / (\omega_1 R_{ri})$, 其中 X'_{ri} 相当于第 i 台电动机定子短路时转子的瞬态电抗, $X'_{ri} = X_{r\sigma i} + (X_{s\sigma i} + X_i)X_{mi} / (X_{s\sigma i} + X_i + X_{mi})$; α_i 为第 i 台电动机的直流分量衰减系数, $\alpha_i = \omega_1 (R_s + R_r) / X'_{si}$ 。

3.2 大规模感应电动机三相短路电流全电流拟合

图 8 给出了配电网感应电动机常见接线结构。

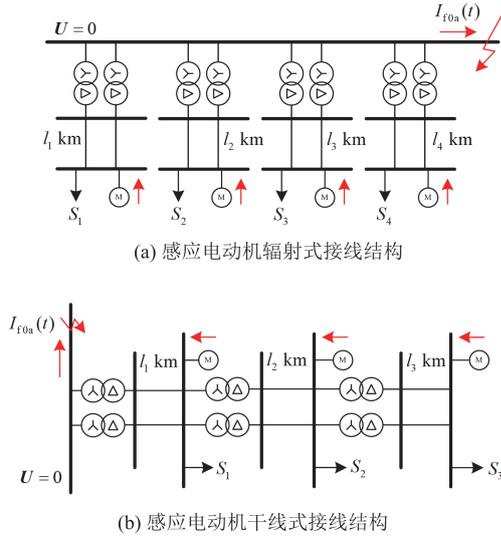


图 8 配电网感应电动机常见接线结构图

Fig. 8 Common wiring structure diagram of induction motor in distribution network

如图 8 所示, 当配电网高压母线发生三相短路时, 由式(8)可知, 配电网中所有感应电动机馈入该母线的 a 相短路电流 $I_{f0a}(t)$ 为

$$I_{f0a}(t) = \sum_{i=1}^n I_{fa}(t) \quad (9)$$

式中: n 为接入配电网的感应电动机台数。

将短路电流 $I_{f0a}(t)$ 与图 9 配电网等值模型的短路电流 $I_{fa}(t)$ 进行等效。由式(3)可得, $I_{fa}(t)$ 可用等

值电动机参数的标么值表示, 如式(10)所示。

$$I_{fa}(t) = \frac{U}{cX'_{s*}} e^{-\alpha t} \cos \varphi - U \left(\frac{1}{cX'_{s*}} - \frac{1}{cX_{s*}} \right) e^{-\frac{t}{T'_r}} \cos(\omega_1 t + \varphi) \quad (10)$$

式中: $c = 3U_m^2 / 2S$, S 为等值电动机容量; $\alpha = \omega_1 R_{s*} / X'_{s*}$; $T'_r = X'_{r*} / (\omega_1 R_{r*})$; R_{s*} 、 X_{s*} 、 X'_{s*} 、 R_{r*} 、 X'_{r*} 均为等值电动机参数标么值。默认详细模型和等值模型母线电压幅值和相位角近似相等。

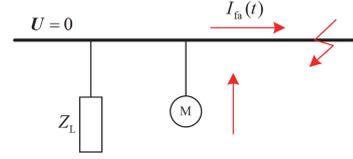


图 9 配电网等值模型图

Fig. 9 Equivalent model diagram of distribution network

可以将详细模型和等值模型短路电流分为直流分量和交流分量分别进行等效, 令

$$\begin{cases} A(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{X'_{si}} e^{-\alpha_i t} \\ B(t) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{X'_{si}} - \frac{1}{X_{si}} \right) e^{-\frac{t}{T'_{ri}}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $A(t)$ 为详细模型直流分量衰减函数; $B(t)$ 为详细模型交流分量衰减函数。

由文献[17]可知, 三相金属性短路电流在前几个周波幅值最大, 为了更好地拟合三相短路电流波形, 取前 3 个正周波的峰值时刻 $t_1 = T/2$ 、 $t_2 = 3T/2$ 、 $t_3 = 5T/2$ 进行等效(其中 $T = 2\pi / \omega_1$)。将等值模型短路电流 $I_{fa}(t)$ 的直流分量和交流分量分别进行泰勒展开取前 4 项, 并将 t_1 、 t_2 和 t_3 代入到详细模型和等值模型中化简可得

$$\begin{cases} A(t_1) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{X'_{si}} e^{-\alpha_i t_1} = \frac{1}{cX'_{s*}} \left[1 - \alpha t_1 + \frac{1}{2} (\alpha t_1)^2 - \frac{1}{3!} (\alpha t_1)^3 \right] \\ A(t_2) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{X'_{si}} e^{-\alpha_i t_2} = \frac{1}{cX'_{s*}} \left[1 - \alpha t_2 + \frac{1}{2} (\alpha t_2)^2 - \frac{1}{3!} (\alpha t_2)^3 \right] \\ B(t_3) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{X'_{si}} - \frac{1}{X_{si}} \right) e^{-\frac{t_3}{T'_{ri}}} = \left(\frac{1}{cX'_{s*}} - \frac{1}{cX_{s*}} \right) \left[1 - \frac{t_3}{T'_r} + \frac{1}{2} \left(\frac{t_3}{T'_r} \right)^2 - \frac{1}{3!} \left(\frac{t_3}{T'_r} \right)^3 \right] \end{cases} \quad (12)$$

其中配电网详细模型和等值模型稳态阶段输出的有功功率和无功功率相等, 则等值模型中恒定阻抗 Z_L 为

$$Z_L = \frac{3U^2}{2[P + jQ + (P_\Sigma + jQ_\Sigma) - S\beta(1 + \tan\theta)]^*} \quad (13)$$

式中： P 和 Q 分别为详细模型总负荷有功功率和无功功率； P_Σ 和 Q_Σ 分别为详细模型中有功功率损耗和无功功率损耗； β 为等值电动机负载率； θ 为等值电动机功率因数角。

利用式(12)和式(13)可以将配电网不同电压等级的负荷等值为一个高压等级的感应电动机负荷和一个恒定阻抗负荷的形式。

图 10 所示为配电网感应电动机混联式接线结构。图中： U_1 和 U_2 分别为母线 1 和母线 2 的电压相量。当配电网中高压母线发生三相短路故障，某条母线节点有两个及两个以上短路电流经由线路流向该母线节点，则该节点定义为“聚合节点”。图 10 中母线 1 和母线 2 即为聚合节点。当计算总聚合节点 1(母线 1)等值聚合模型时，需要将所有其他聚合节点的负荷都等值为一个感应电动机和恒定阻抗负荷形式，最后进行总聚合节点负荷的聚合。

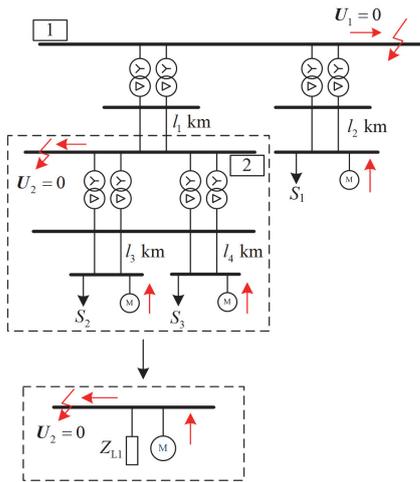


图 10 配电网感应电动机混联式接线结构图

Fig. 10 Hybrid wiring structure diagram of distribution network induction motor

3.3 适用于大规模感应电动机三相短路电流计算的负荷聚合步骤

1) 确定配电网感应电动机负荷、恒定阻抗负荷、变压器、线路等电气参数，根据配电网的结构确定所有聚合节点，并选择一个总聚合节点(一般为配电网最高电压等级母线)。

2) 分聚合节点(低压母线向高压母线)负荷聚合

(1) 选择分聚合节点母线发生三相金属短路，并将该节点区域中所有电动机电气参数归算到发生三相短路的母线侧，根据变压器和线路参数计算出所有电动机的附加阻抗 Z_f ，并求出直流分量衰减函数

$A(t)$ 和交流分量衰减函数 $B(t)$ ；

(2) 根据分聚合节点母线电压等级和等值电动机已知参数 X_{s*} 、 X'_{s*} 、 X'_{r*} ，采用三相短路电流直流分量和交流分量分别等效的方法求出分聚合节点等值模型中电动机参数 S 、 R_{s*} 、 R_{r*} ；

(3) 据配电网负荷功率分布、线路和变压器功率损耗 P_Σ 和 Q_Σ 、等值电动机负载率 β 、功率因数角 θ ，计算分聚合节点等值模型中的恒定阻抗。

3) 总聚合节点负荷聚合

将配电网中所有分聚合节点等值为一个感应电动机和恒定阻抗负荷形式。最后选择总聚合节点母线发生三相金属短路，重复 2) 中步骤即可求得配电网等值模型参数。

3.4 大规模感应电动机配电网负荷建模及短路电流曲线拟合

对于配电网中的感应电动机负荷，按照其参数特点，可划分为：中压(10 kV/6 kV/3 kV)工业感应电动机、400 V 工业感应电动机、400 V 商业居民空调感应电动机 3 类。各类感应电动机负荷节点及参数如表 1 所示。

表 1 配电网各类感应电动机负荷节点及参数

Table 1 Load nodes and parameters of various induction motors in distribution network

感应电动机 负荷节点	电压 等级/ kV	$R_s/$ p.u	$X_{so}/$ p.u	$X_m/$ p.u	$R_r/$ p.u	$X_{ro}/$ p.u	负荷 比例/ %
3,4,5,6	10	0.013	0.067	3.80	0.009	0.170	15
10,15,18	6	0.010	0.150	2.50	0.008	0.250	15
7,12,17,19	3	0.015	0.250	2.50	0.008	0.250	15
8,9,20,21	0.4	0.031	0.100	3.20	0.018	0.180	7.5
11,13,14,16	0.4	0.100	0.100	1.80	0.088	0.058	7.5

图 11 展示了 21 节点配电网详细模型拓扑结构。该模型包含 35、10、6、3、0.4 kV 共 5 个电压等级的详细负荷。其中节点 1 为无穷大系统，经 50 km 线路连接至 35 V 母线(节点 2)。系统总负载为 160 MW，用 60%感应电动机负荷+40%恒定阻抗负荷形式，其中配电网恒定阻抗负荷功率分布见表 2。感应电动机负载率为 0.4、转差率为 0.02、功率因数为 0.8。通过 35 kV 等效感应电动机与恒定阻抗组合建立等值模型。2 s 时刻在 35 kV 母线处设置三相金属短路故障，故障时长为 0.5 s，由图 11 可知，节点 2、4、5、15 为聚合节点，其中节点 2 为总聚合节点。通过 3.3 节中介绍的等值方法，可以计算出各聚合节点等值模型的相关电气参数，结果如表 3 所示。对比总聚合节点详细模型和等值模型三相金属性短路 a 相短路电流、有功功率和无功功率拟合情况，拟

合曲线如图 12 所示。

由图 12 可知, 等值模型可以全面描述详细模型三相金属性短路电流、有功功率和无功功率特性。因此在配电网高压母线发生三相金属性短路时,

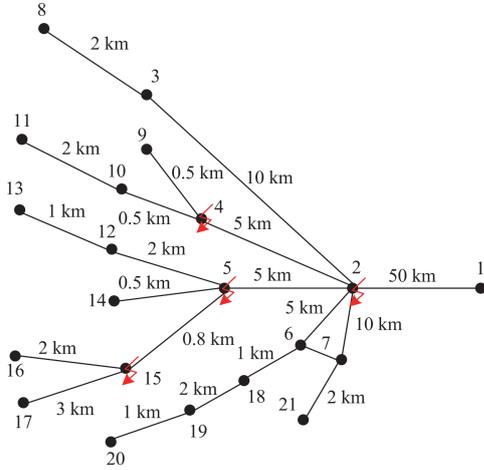


图 11 21 节点配电网详细模型拓扑结构图
Fig. 11 Detailed model topology diagram of 21-node distribution network

表 2 配电网恒定阻抗负荷功率分布

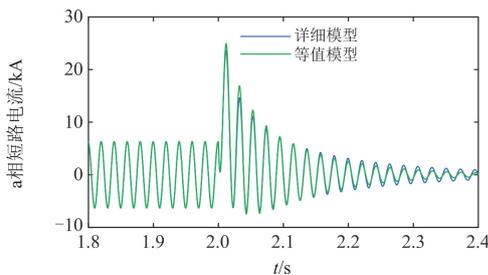
Table 2 Power distribution of constant impedance load in distribution network

节点	恒定阻抗负荷功率分布/MVA
8	16 + j12
9	16 + j12
21	32 + j24

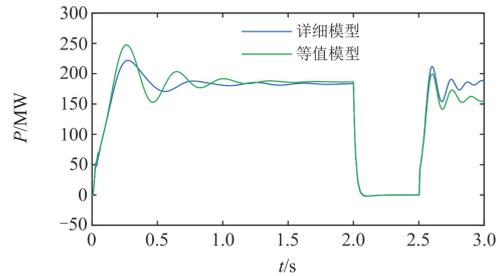
表 3 详细模型各聚合节点等值模型参数

Table 3 Detailed model with equivalent model parameters for each aggregation node

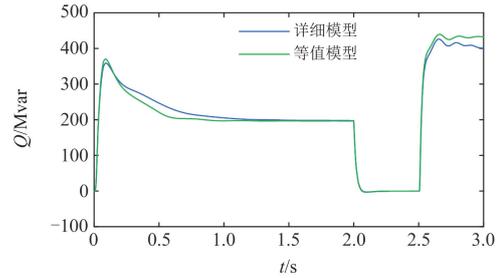
聚合节点	电压等级/kV	$R_s/p.u.$	$X_{s0}/p.u.$	$X_m/p.u.$	$R'_t/p.u.$	$X'_{t0}/p.u.$	等值额定容量/MVA
15	6	0.0138	0.18	3.50	0.011	0.12	30.14
5	10	0.0220	0.18	3.50	0.010	0.12	72.23
4	10	0.0200	0.18	3.50	0.012	0.12	52.13
2	35	0.0280	0.18	3.50	0.009	0.12	236.42



(a) 三相金属性短路电流



(b) 有功功率



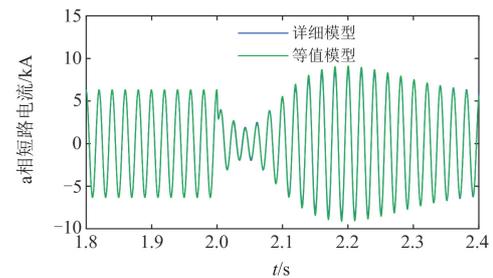
(c) 无功功率

图 12 节点 2 发生三相金属性短路配电网详细模型和等值模型拟合曲线图

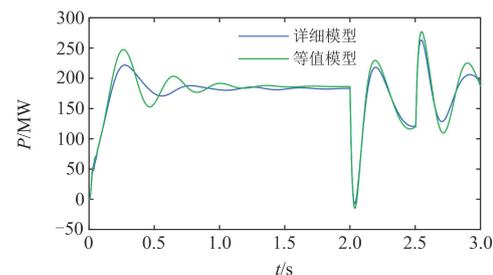
Fig. 12 Fitting curve diagram of detailed model and equivalent model for a three-phase metallic short circuit at node 2 in distribution network

为了三相短路电流计算简便, 可以利用上述聚合方法用等值模型来代替配电网详细模型进行三相金属性短路电流计算。

图 13 给出了节点 2 母线在 2 s 时刻发生三相经电阻短路故障, 故障持续 0.5 s, 节点 2 母线电压跌



(a) 三相金属性短路电流



(b) 有功功率

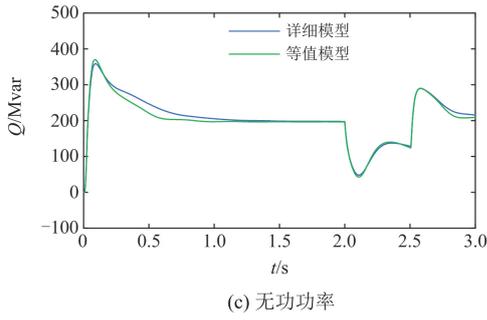


图 13 节点 2 发生三相经电阻短路配电网详细模型和等值模型拟合曲线图

Fig.13 Fitting curve diagram of the detailed model and equivalent model for a three-phase resistance-grounded short circuit at node 2 in the distribution network

落至 0.7 p.u.的配电网详细模型和等值模型 a 相短路电流、有功功率和无功功率波形拟合结果。

图 13 的拟合结果表明,等值模型能够准确描述详细模型在三相经电阻短路时的短路电流输出特性。在稳态及低电压暂态期间,节点 2 母线的功率拟合精度较高,证明等值模型可有效反映详细模型的稳态和暂态特性,验证了基于三相短路电流的配电网负荷聚合方法的可行性。

4 大规模多类型馈入源系统三相短路电流联合计算

4.1 配电网和新能源场站联合的系统三相短路故障稳态电流计算

当所有新能源场站和配电网接入到同一电压母线,公共母线出口处发生三相经电阻短路故障时,系统拓扑结构如图 14 所示。

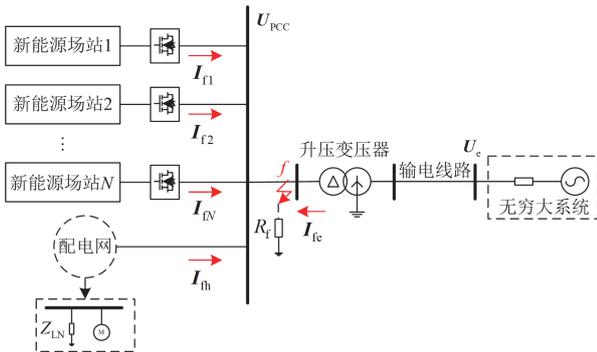


图 14 配电网和新能源场站联合系统拓扑结构图

Fig. 14 Topology diagram of joint system of distribution network and new energy station

图 14 中: I_{f1}, \dots, I_{fN} 分别为新能源场站 1, 2, \dots, N 馈入的短路电流; I_{fh} 为配电网详细模型馈入的短路

电流; I_{fe} 为无穷大系统馈入的短路电流; U_{PCC} 为公共点母线电压; Z_{LN} 为配电网等值模型额定阻抗; R_f 为故障电阻。

由第 2 节和第 3 节可知,计算新能源场站的三相故障稳态电流可直接将新能源场站等值为压控电流源。计算配电网馈入的三相短路电流可先将详细模型通过短路电流波形拟合的方法进行等值。在计算等值模型馈入的短路电流故障稳态值时,也可以将等值模型等效为压控电流源。其中配电网和新能源场站联合系统故障稳态等值模型如图 15 所示。

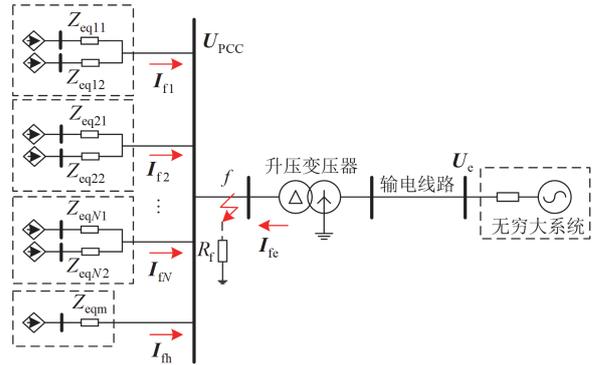


图 15 配电网和新能源场站联合系统故障稳态等值模型

Fig. 15 Steady state equivalent model of fault in the joint system of distribution network and new energy station

图 15 中: $Z_{eq11}, Z_{eq12}, \dots, Z_{eqN1}, Z_{eqN2}$ 分别为新能源场站 1, 2, \dots, N 等值模型的等效阻抗; Z_{eqm} 为配电网等值受控源模型的等效阻抗^[6]。设新能源场站和配电网公共连接点母线电压幅值为 U_{PCC} , 母线电压标幺值为 U_{PCC^*} , 相位角为 φ_{PCC} , 所有新能源场站馈入的三相短路电流故障稳态值为 I_{fnew} , 则有

$$I_{fnew} = \sum_{i=1}^N I_{fi} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N M_i I_{gi.av} & U_{PCC^*} > 0.9 \text{ p.u.} \\ \sum_{i=1}^N (m_{i1} I_{gi1} + m_{i2} I_{gi2}) & U_{PCC^*} \leq 0.9 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (14)$$

式中: I_{fi} 为第 i 个新能源场站馈入的短路电流; M_i 为第 i 个新能源场站发电单元个数; $I_{gi.av}$ 为第 i 个新能源场站的平均输出电流; m_{i1} 和 m_{i2} 为第 i 个新能源场站根据平均电压分群后各自发电单元个数(其中 $M_i = m_{i1} + m_{i2}$); I_{gi1} 和 I_{gi2} 为第 i 个新能源场站根据分群后各自平均功率对应的输出短路电流。

设配电网等值模型中感应电动机额定电压为 U_N , 额定容量为 S_N , 负载率为 β_N , 额定功率因数为 λ_N , 假设在电压跌落期间感应电动机负载率不

变。当电压跌落较小时, 由于感应电动机负载率恒定, 感应电动机可以继续维持额定功率; 但是当母线电压跌落较大时, 感应电动机难以维持额定功率, 感应电动机的功率因数会减小, 设感应电动机功率因数减小为 λ' , 则

$$\lambda' = \lambda_N \times \left(\frac{U_{PCC}}{U_N} \right)^\tau \quad (15)$$

式中: τ 为一个经验常数, 与负载类型和电压变化等因素有关, 一般取值为 1~2, 本文对 τ 进行动态调整, 取值为 $1.5 - U_{PCC}/U_N$ 。

在母线电压跌落较大时, 感应电动机输出的有功功率较小, 当感应电动机负载较轻时, 实际故障稳态时定子侧电流也较小。为了方便计算感应电动机定子侧电流故障稳态值, 在感应电动机端口电压跌落较大时, 感应电动机的输入有功功率和输出有功功率看作近似相等。设配电网等值模型中感应电动机馈入的三相短路电流故障稳态值为 I_{fmotor} , 其中幅值为 I_{fmotor} , 相位角为 φ_{fmotor} , 则有

$$I_{fmotor} = \begin{cases} \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{PCC}} & U_{PCC^*} \geq U_{b^*} \\ \frac{S_N \lambda'}{\sqrt{3}\beta_N U_{PCC}} & 0 < U_{PCC^*} < U_{b^*} \end{cases} \quad (16)$$

$$\varphi_{fmotor} = \begin{cases} \varphi_{PCC} - \varphi_N + \pi & U_{PCC^*} \geq U_{b^*} \\ \varphi_{PCC} - \arccos \lambda' + \pi & 0 < U_{PCC^*} < U_{b^*} \end{cases}$$

式中: φ_N 为感应电动机额定功率因数角; U_{b^*} 为感应电动机功率因数减小时的临界电压标幺值(根据具体的感应电动机确定)。

综上所述, 所有新能源场站和配电网等值模型馈入短路点的三相短路电流故障稳态值 I_f 为

$$I_f = \sum_{i=1}^N I_{fi} + I_{th} = \sum_{i=1}^N I_{fi} - \frac{U_{PCC}}{Z_{LN}} + I_{fmotor} \quad (17)$$

4.2 配电网和新能源场站联合的系统三相短路故障稳态电流计算仿真验证

为验证所提三相短路故障稳态电流计算方法的准确性, 基于 PSCAD 搭建了配电网与新能源场站联合系统的电磁暂态仿真模型。图 16 展示了系统拓扑结构, 其中配电网采用图 11 所示详细模型(总聚合节点为节点 2), 其等值参数见表 3。图 17(a)~图 17(c)分别给出了光伏(0.2 MW/单元, 两级式结构)、风电(2 MW/单元, 直驱型)和储能(1 MW/单元)场站的详细拓扑, 各场站均通过 220 kV/35 kV 变压器并入无穷大电网, 且所有逆变型发电单元均采用式(1)的低电压穿越策略。具体发电单元配置及输出功率见表 4~表 6。

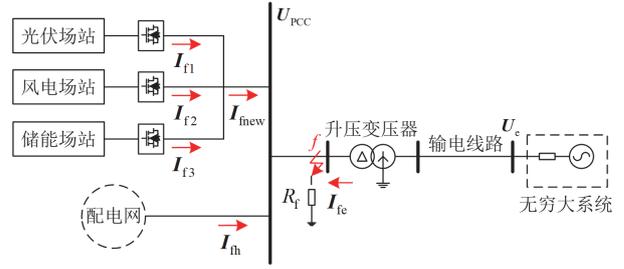
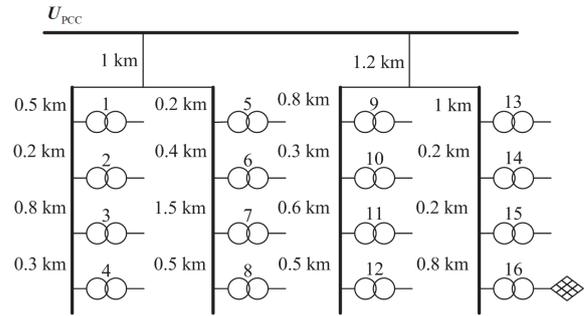
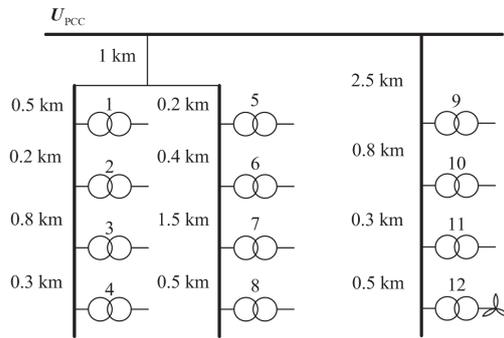


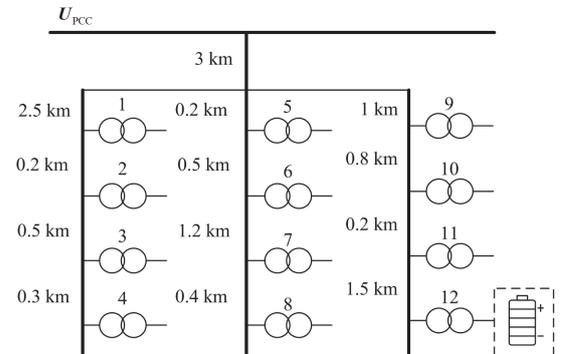
图 16 配电网和新能源场站联合系统详细模型图
Fig. 16 Detailed model diagram of the joint system of distribution network and new energy station



(a) 光伏场站详细模型拓扑结构图



(b) 风电场站详细模型拓扑结构图



(c) 储能场站详细模型拓扑结构图

图 17 新能源场站详细模型拓扑结构图

Fig. 17 Detailed model topology diagram of new energy station

表 4 光伏场站发电单元个数及输出功率

Table 4 Number of power generation units and output power of photovoltaic power plants

编号	发电单元个数	发电单元输出功率/p.u.	编号	发电单元个数	发电单元输出功率/p.u.
1	10	0.8	9	5	1.0
2	12	0.8	10	13	1.0
3	10	0.8	11	15	0.9
4	15	0.8	12	20	0.9
5	5	1.0	13	15	0.8
6	20	1.0	14	10	0.8
7	5	0.5	15	15	0.8
8	10	0.5	16	20	0.8

表 5 风电场站发电单元个数及输出功率

Table 5 Number of power generation units and output power of wind farm stations

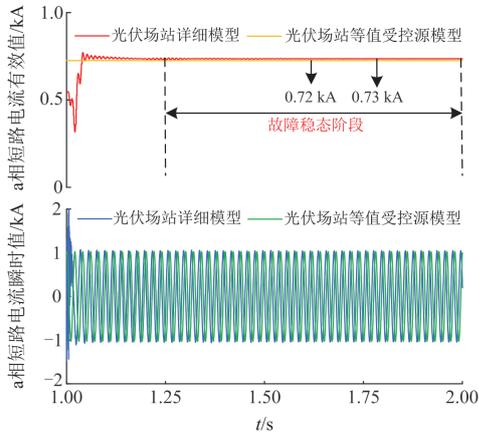
编号	发电单元个数	发电单元输出功率/p.u.	编号	发电单元个数	发电单元输出功率/p.u.
1	5	1.0	7	5	0.2
2	15	1.0	8	10	0.2
3	10	0.9	9	5	0.6
4	5	0.9	10	20	0.6
5	5	0.4	11	5	0.6
6	10	0.4	12	5	0.6

表 6 储能场站发电单元个数及输出功率

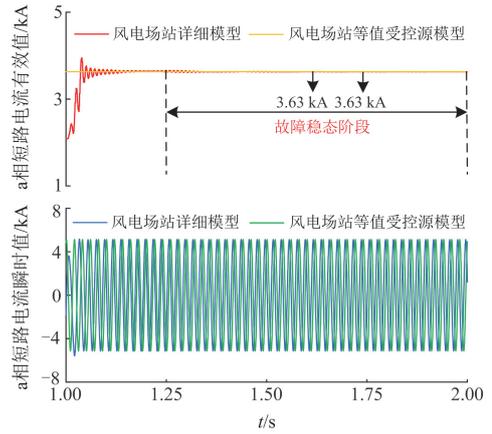
Table 6 Number of power generation units and output power of energy storage stations

编号	发电单元个数	发电单元输出功率/p.u.	编号	发电单元个数	发电单元输出功率/p.u.
1	10	0.8	7	14	0.8
2	20	0.8	8	14	0.8
3	15	0.4	9	14	0.9
4	5	0.4	10	20	0.9
5	10	1.0	11	10	1.0
6	10	1.0	12	8	1.0

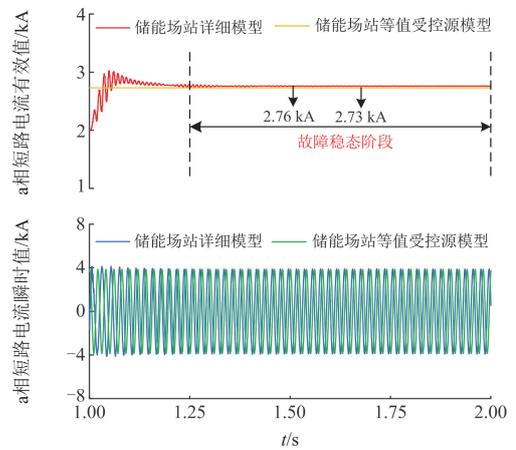
图 18 分别给出了公共并网点(point of common connection, PCC)电压出口处发生三相经电阻短路,



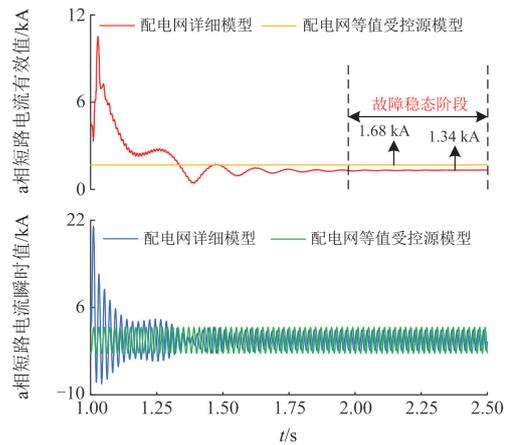
(a) 光伏场站详细模型和等值受控源模型



(b) 风电场站详细模型和等值受控源模型



(c) 储能场站详细模型和等值受控源模型



(d) 配电网详细模型和等值受控源模型

图 18 配电网和新能源场站联合系统各馈入源详细模型和等值受控源模型三相短路电流瞬时值和有效值($U_{PCC^*} = 0.1$)

Fig. 18 Detailed models and equivalent controlled source models of each input source in the joint system of distribution network and new energy station, instantaneous and effective values of three-phase short-circuit current ($U_{PCC^*} = 0.1$)

故障时刻为 1 s, 故障持续 1.5 s, PCC 点电压跌落至 0.1 p.u.时不同类型新能源场站、配电网的详细模型和等值受控源模型 a 相短路电流的瞬时值和有效值仿真波形图。表 7 为 PCC 点电压跌落不同程度时, 新能源场站和配电网以及联合系统各馈入源详细模型和等值受控源模型馈入的三相短路故障稳态电流。

表 7 PCC 点电压跌落不同程度新能源场站和配电网联合系统各馈入源详细模型和等值受控源模型馈入的故障稳态电流
Table 7 Detailed and equivalent models of the fault steady-state current fed into the joint system of new energy stations and distribution networks with varying degrees of voltage drop at PCC points for each input source

PCC 点 电压/p.u.	新能源场站总 馈入短路电流		配电网馈入短路 电流 I_{Dn}/kA		联合系统馈入短 路电流 I_F/kA	
	I_{new}/kA					
	实际值	计算值	实际值	计算值	实际值	计算值
0.80	5.70	5.81	4.36	4.71	3.51	3.59
0.75	5.89	6.01	4.39	4.72	3.26	3.31
0.68	6.21	6.36	4.89	4.93	3.31	3.06
0.55	6.67	6.82	5.63	5.41	3.73	3.23
0.40	6.98	7.05	5.42	5.06	4.14	4.48
0.25	7.01	6.93	3.54	3.68	3.96	3.78
0.10	7.11	7.08	1.34	1.68	5.42	5.78

由图 18 和表 7 的计算结果可知, 新能源场站和配电网联合系统各馈入源的详细模型和等值受控源模型三相短路故障稳态电流误差较小, 所以本文提出的配电网和新能源场站联合系统三相短路故障稳态电流计算方法精确度较高, 具有较强的实用性。并且从仿真结果可以得出, 随着 PCC 点电压跌落的增大, 新能源场站馈入的短路电流不断增大, 配电网馈入的短路电流先逐渐增大到最大值然后逐渐减小。

5 结论

1) 为简化配电网感应电动机馈入短路点的短路电流计算, 本文提出了一种将三相短路电流分为直流分量和交流分量分别进行等效的负荷聚合方法。通过在大型配电网中进行仿真验证, 结果表明, 详细模型与等值模型在短路电流和功率曲线的拟合精度方面表现出较高的一致性, 因此配电网的等值模型可有效替代详细模型进行三相短路电流的计算。

2) 当配电网和新能源场站共同接入到公共电压母线计算三相短路故障稳态电流时, 可先将新能源场站等值为压控电流源, 将配电网详细模型通过基于三相短路电流的聚合方法进行等值, 然后将等值模型也等效为压控电流源进行故障稳态短路电流的计算。将计算结果和仿真结果进行对比, 结果表明该计算方法精确度较高, 实用性较好。

参考文献

- [1] 董秀成, 皮光林. 能源地缘政治与中国能源战略[J]. 经济问题, 2015(2): 6-8.
DONG Xiucheng, PI Guanglin. Energy geopolitics and China's energy strategy[J]. On Economic Problems, 2015(2): 6-8.
- [2] 李响, 武海潮, 王文雪, 等. 考虑大规模新能源接入的电网性能评价指标体系[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 178-187.
LI Xiang, WU Haichao, WANG Wenxue, et al. Performance evaluation index system of a power grid considering large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 178-187.
- [3] 陶劲宇, 秦川, 金宇清, 等. 面向新型电力系统的负荷模型研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(5): 168-187.
TAO Jinyu, QIN Chuan, JIN Yuqing, et al. A review of load models for new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(5): 168-187.
- [4] XU Dongliang, XU Junjun, QIAN Cheng, et al. A pseudo-measurement modelling strategy for active distribution networks considering uncertainty of DGs[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(5): 1-15.
- [5] SHUAI Z, SHEN C, YIN X, et al. Fault analysis of inverter-interfaced distributed generators with different control schemes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 33(3): 1223-1235.
- [6] 洪树斌, 范春菊, 陈实, 等. PQ 控制策略下多逆变器电源的故障等值方法[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1101-1109.
HONG Shubin, FAN Chunju, CHEN Shi, et al. Research on fault equivalence method for multiple inverter-interfaced distributed generation based on PQ control strategy[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1101-1109.
- [7] FURLANETO R M, KOCAR I, GRILO-PAVANI A, et al. Short circuit network equivalents of systems with inverter-based resources[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 199.
- [8] 焦彦军, 梁霄, 蒋晨阳. 计及 LVRT 控制策略的光伏电站并网配电网故障分析方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 92-99.
JIAO Yanjun, LIANG Xiao, JIANG Chenyang. Failure analysis method in distribution network considering LVRT control strategy of grid-connected photovoltaic station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 92-99.
- [9] 汤亚芳, 宋国兵, 郝正航, 等. 逆变器电源场站故障稳态电流实用化计算方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(10): 182-191.
TANG Yafang, SONG Guobing, HAO Zhenghang, et al. Practical calculation method for fault steady-state current in inverter-interfaced generator stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10): 182-191.
- [10] 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]. 电网技术, 2023, 47(10): 4161-4169.
- JIA Ke, KONG Fanzhe, ZHANG Yang, et al. Fault equivalent modeling of doubly fed wind farm based on improved K-means algorithm[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4161-4169.
- [11] 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.
- [12] MILANOVIĆ J V, AUNG M T, VEGUNTA S C. The influence of induction motors on voltage sag propagation—part I: accounting for the change in sag characteristics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 1063-1071.
- [13] 刘楠, 张彦涛, 秦晓辉, 等. 感应电动机负荷对短路电流影响机理研究[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 187-192.
- LIU Nan, ZHANG Yantao, QIN Xiaohui, et al. Impact of load induction motor on power system short-circuit current calculation[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 187-192.
- [14] HOWARD D F, HABETLER T G, HARLEY R G. Experimental study on the short-circuit contribution of induction machines[C]// 2013 International Electric Machines & Drives Conference, May 12-15, 2013, Chicago, IL, USA: 960-967.
- [15] 周念成, 罗艾青, 王强钢, 等. 含多感应发电机的配电网短路计算对称分量法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 65-70.
- ZHOU Niancheng, LUO Aiqing, WANG Qianggang, et al. Symmetrical components method for short-circuit current calculation of induction generators in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 65-70.
- [16] 姜杰, 许宏, 陈贵文, 等. 电压跌落时感应电动机反馈电流计算及转速影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 31-37.
- JIANG Jie, XU Hong, CHEN Guiwen, et al. Induction motor feedback current calculation and speed factor analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 31-37.
- [17] 张美伦, 张瑾, 王冠博, 等. 短路电流计算等效负荷模型研究[J]. 黑龙江电力, 2022, 44(3): 205-208.
- ZHANG Meilun, ZHANG Jin, WANG Guanbo, et al. Study on equivalent load model for short circuit current calculation[J]. Heilongjiang Electric Power, 2022, 44(3): 205-208.
- [18] 杨玉坤, 许建中. 基于超级电容储能的大容量直驱风电机组低电压穿越策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 106-116.
- YANG Yukun, XU Jianzhong. Low voltage ride-through strategy for high-capacity direct-drive wind turbines based on supercapacitor energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 106-116.
- [19] 史昭娣, 朱宁, 李政, 等. 计及源-荷匹配的多区域多类型新能源系统优化规划方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(4): 67-76.
- SHI Zhaodi, ZHU Ning, LI Zheng, et al. Optimization planning method of multi-region and multi-type renewable energy generation considering source-load matching[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 67-76.
- [20] 郑天悦, 邓俊, 王潇桐, 等. 基于电压与功率分布特性的新能源场站等值建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(22): 47-58.
- ZHENG Tianyue, DENG Jun, WANG Xiaotong, et al. Equivalent modeling method based on voltage and power distribution characteristics of a renewable energy station[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 47-58.
- [21] 周海锋, 徐伟, 沙立成, 等. 考虑新能源不确定性的调度计划安全稳定校核方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 63-70.
- ZHOU Haifeng, XU Wei, SHA Licheng, et al. Security and stability checking method of dispatching plan considering uncertainty of new energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 63-70.
- [22] 徐可寒, 张哲, 刘慧媛, 等. 光伏电源故障特性研究及影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 359-371.
- XU Kehan, ZHANG Zhe, LIU Huiyuan, et al. Study on fault characteristics and its related impact factors of photovoltaic generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 359-371.
- [23] 汤蕴璆, 张奕黄, 范瑜. 交流电机动态分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [24] 魏旭辉. 基于双馈风电场的故障暂态等值方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- WEI Xuhui. Study on the fault transient equivalence method based on the DFIG wind farm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [25] 汤涌, 侯俊贤, 刘文焯. 电力系统数字仿真负荷模型中配电网及无功补偿与感应电动机的模拟[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 10-14.
- TANG Yong, HOU Junxian, LIU Wenzhuo. The modeling of distribution network and var compensator and induction motor in the load model for power system digital simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 10-14.

收稿日期: 2024-12-23; 修回日期: 2025-04-10

作者简介:

李祺平(1999—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统和高压直流输电研究; E-mail: scu_lqp@163.com

李保宏(1986—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 从事电力系统稳定与控制 and 高压直流输电研究。E-mail: scu_lbh@163.com

(编辑 周金梅)