

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240053

基于不对称低压穿越的逆变型电源的故障计算模型

汤先航, 莫仕勋, 刘斌, 刘庆浩, 莫钰滢

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 新能源具有分布特性, 使得新型电力系统易发生近电源故障, 导致三相不对称, 对逆变型电源的影响难以忽略。逆变型电源的传统正序模型只能对称地输出无功补偿, 无法正确地计算新型电力系统的近电源不对称故障。基于此, 首先指出现有低压穿越规范在三相不对称时存在的问题, 并对其进行改进和完善, 采用相电压指标设计了一套不对称低压穿越规范。然后, 建立了逆变型电源的通用故障计算模型, 并分别分析了其接入大电流和小电流接地系统时的等效方法, 通过对单电源系统的仿真来验证模型的有效性。最后, 提出了新型电力系统的相分量故障计算方法, 推导了各故障类型和逆变型电源模型的代入计算方法。并通过算例验证了所提算法的正确性。

关键词: 逆变型电源; 不对称低压穿越; 故障计算模型; 新型电力系统; 相分量法

Fault calculation model of inverter power supply based on asymmetric low-voltage ride through

TANG Xianhang, MO Shixun, LIU Bin, LIU Qinghao, MO Yuying

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The distribution characteristics of new energy make it easy for near power failures to occur in new power systems, leading to it being difficult to ignore the impact of three-phase asymmetry on inverter power supply. The traditional positive sequence model for inverter power supply can only symmetrically output reactive power compensation. It cannot accurately calculate the near power asymmetric faults. First, this paper points out the problems of the existing low-voltage ride through specifications when three-phase asymmetry occurs. It improves them, and designs a set of asymmetric low-voltage ride through specifications using phase voltage indicators. Then, a universal fault calculation model for the inverter power supply is established, and its equivalent methods when connected to high current and low current grounding systems are analyzed respectively. The effectiveness of the model is verified through simulation of the single power supply system. Finally, the phase component fault calculation method for the new power system is proposed, and the substitution calculation methods for various fault types and inverter power supply model are derived. The correctness of the proposed algorithm is verified through numerical examples.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377172).

Key words: inverter power supply; asymmetric low-voltage ride through; fault calculation model; new power system; phase component method

0 引言

在“30·60双碳目标”和“构建新型电力系统”战略^[1-5]的要求下, 新能源电源将代替同步发电机来决定系统的暂态稳定性^[6-9]。与同步发电机相比, 逆变型新能源电源虽然没有物理转动惯性和自动励磁系统, 但其可以通过设计合适的控制策略来调节输出量, 甚至能够更加精确和灵活地给予系统稳定性

支撑, 对此, 电力电子领域的研究人员做了大量的控制策略研究, 覆盖了实际应用中出现的故障场景。然而, 目前逆变型电源的故障模型大多仍为传统正序模型, 只适用于通过对称分量法进行近似计算, 与先进的控制策略不符, 不能体现新能源作为主体对系统提供主要且灵活的稳定支撑, 难以面对新型电力系统中近电源不对称故障等实际问题。本文旨在解决现有方法在面向新型电力系统时的局限, 建立逆变型电源的通用故障模型。

可以预见不久的将来, 当逆变型电源大规模接

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52377172)

入新型电力系统并逐步成为发电主体时, 由于风光等新能源具有自然分布的地理特征, 又由于电网划分为输电网和配电网, 其中输电网在地理上占大部分比例, 故未来大多数的逆变型电源将直接接入输电网, 且需要对电网提供主要的稳定性支撑。电力系统的大多数故障发生在架空线路, 因此, 本文的重点研究对象为输电网架空线路的短时不对称故障, 兼顾配电网的不对称故障和负荷。

针对接入配电网的逆变型分布式电源(inverter interfaced distributed generation, IIDG), 研究者最初将其近似划分为各类常见节点^[10], 但随着系统中 IIDG 的增多, 这种简单划分误差较大, 于是在对称条件下建立 IIDG 的等效数学模型, 最常见的是等效为压控电流源, 并考虑其低压穿越(low-voltage ride through, LVRT)要求^[11-12], 即在并网点(point of common coupling, PCC)电压跌落时, IIDG 需不退网并向电网注入无功电流来帮助调压, 使 PCC 电压保持在允许裕度内。

针对 IIDG 所在配电网的不对称故障, 文献[13]提出通过计及负序短路电流来处理不对称故障产生的正序偏差, 文献[14]提出通过计算 PCC 的电压进而分析相间短路故障, 文献[15-17]则系统分析了运用对称分量法计算不对称故障, 将 IIDG 视为只在正序网络出现的压控电流源, 利用故障边界条件建立方程求解。在此基础上, 文献[18]拓展研究了小电阻接地方式配电网的单相接地故障, 文献[19]研究了断线故障的情况。以上研究均是以系统三相对称为前提条件, 将 IIDG 等效为正序电源, 本质上即三相对称输出模型, 使之可以简便地代入复合序网, 从而运用对称性计算各种类型的故障。

对于新型电力系统中逆变型电源作为发电主体而接入输电网的场景, 由于风光等新能源的地理特征, 新型电力系统的逆变型新能源电站呈现分布接入的特点, 易使得电源到线路故障点的电气距离较短; 又由于架空线路最常见的故障是不对称程度最严重的单相接地故障, 使得逆变型电源并网端的三相不对称不能忽视。相比于配电网, 输电网对三相对称性和各相过电压有着严格的规定, 这就要求逆变型电源在出现不对称情况, 即发生近距离的不对称故障时, 不能仅仅对称地输出无功支撑。对此研究人员设计了多种不对称输出的控制策略^[20-22], 能够只针对低压相提供电压支撑, 有效抑制三相不对称问题, 发挥了逆变型电源的灵活控制优势。因此, 逆变型电源的正序故障模型已不满足新型电力系统发生不对称故障时对电源的要求, 不符合目前先进的控制策略, 无法体现逆变型电源相比于同步发电

机的灵活性特征。

要想等效逆变型电源故障期间不对称输出, 就需要讨论其负序的模型, 对此文献[23]提出将负序网络中的 IIDG 等效为一个可调阻抗, 将该阻抗调为无穷大则等效了正常运行下的抑制负序电流控制。这种方法虽然易于建立 IIDG 不对称输出的等效序网模型, 但故障时, 可调负序阻抗难以通过低压穿越要求得到一个代数值, 且该阻抗值难以分别反映 IIDG 各相输出的不平衡无功补偿数值, 无法进行下一步的故障计算。文献[24]基于相分量建立了双馈型新能源的三相不对称故障模型, 但该文没有研究逆变型新能源, 仍将其作为正序电源处理。综合以上研究的思路, 认为在对称分量法的序坐标下难以建立满足要求的逆变型电源不对称故障计算模型, 故本文基于相分量来建模, 并给出相应的相分量故障计算方法。

为了更好地面向新型电力系统, 本文拟建立一套逆变型电源的通用故障计算模型, 满足以下要求:

(1) 能够解决近电源不对称故障和近电源负荷不对称所要求的不对称补偿的计算问题, 符合先进的控制策略;

(2) 无新能源比例限制, 在全比例新能源供电时均能够满足低压穿越和无功补偿的要求;

(3) 能够兼容发电机、变压器、线路等传统电网元件的相分量模型, 并使用相分量法进行故障计算, 运用控制特性灵活实现对新型电力系统的不对称低压穿越。

本文首先指出现有 LVRT 规范在面对并网端三相不对称情况时存在的问题, 将其改进完善为不对称低压穿越(asymmetric low-voltage ride though, ALVRT)规范, 提供了并网端各相电压幅值的允许裕度, 同时在满足国标规定下设计了 ALVRT 的具体范值。然后, 建立了逆变型电源的故障计算模型, 分别分析了其并入大电流接地与小电流接地系统的等效方法, 并通过对单电源系统的仿真来验证模型的有效性。最后, 提出了一套面向新型电力系统的故障计算流程, 分析了对各故障类型的处理方法, 以及逆变型电源模型的代入方法, 通过算例验证了所提算法的正确性。

1 不对称低压穿越

现有低压穿越规范与本文设计的 ALVRT 规范方案如图 1 所示。

1.1 LVRT 存在的问题

现有 LVRT 规范如图 1(a)所示, 其规定对于三相短路故障和两相短路故障考核并网点线电压, 而

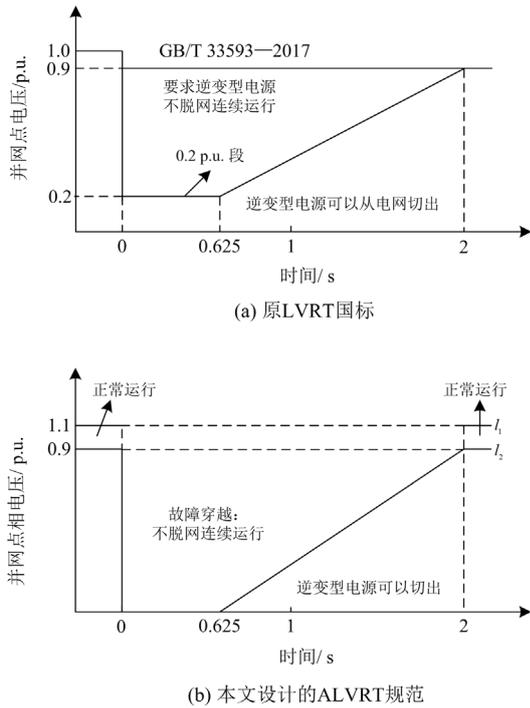


图1 原LVRT国标和新ALVRT规范方案

Fig. 1 Old LVRT national standard and new ALVRT regulation scheme

对于单相接地故障考核并网点相电压。当考核线电压时，标准为动态无功电流 $I_T \geq 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N$ ，研究人员基于此建立了 IIDG 三相对称输出的正序故障模型，并开发了基于对称分量法的故障计算方法。但对于考核相电压的情况仍处于研究空缺中，且使用与线电压相同的曲线进行考核并不合理。具体问题如下所述。

(1) 考核线电压指标中的“0.2 p.u.段”表示当发生罕见的三相严重低压情况时，IIDG 需立即退出，例如发生三相接地故障。但考核相电压时，采用同样的指标是不合理的：

低压穿越的初衷之一是预防连锁故障，高比例新能源系统连锁故障的成因是：靠近故障的电源先行退网，使得无功缺失更加严重，导致低压范围扩大，造成更多的电源在短时间内接连退网，产生连锁反应，导致有功功率严重缺额，最终导致电网崩溃，如英国“8·9”大停电^[25-26]。

单相接地故障是架空线路最常见的故障，同时也是不对称程度最严重的故障，接地相的电压会大幅度降低，在金属性接地时甚至接近 0，对于近距离接入的逆变型电源，此时若仍设定“0.2 p.u.段”，即故障相电压低于 0.2 p.u.时立即退网，则容易发生上述的连锁故障，造成新型电力系统的崩溃，

违背了低压穿越的初衷，更无法向系统提供应有的无功支持。

因此，考核相电压的指标应当改进完善，使得在发生单相接地故障等常见的严重不对称故障时，逆变型电源能够持续运行不退网，进而穿越不对称低压状态。

(2) 面向新型电力系统时，对于逆变型电源作为发电主体接入输电网的场景：与配电网不同，输电网由于高电压等级和中性点直接接地方式，对于三相不平衡和过电压有着严格的要求，高压设备的绝缘水平也是按照额定相电压设计的。

若仍按照现有国标采用的线电压指标或当前研究大多采用的传统正序模型，即电源在短时故障期间仍输出三相对称的电流而等效为正序电源，则发生单相接地故障等严重不对称故障时，非故障相会受到无功补偿，造成“越补偿越不平衡”和“按比例抬高非故障相电压”，进而容易造成设备绝缘击穿等严重后果，这种情况是不能允许的。

因此，本节面向新型电力系统所提的逆变型电源不对称低压穿越是必要的，即逆变型电源应当向低压相输出无功补偿，避免向非低压相输出无功。

(3) 在三相电压对称时的正序电压即为线电压，故线电压的考核指标适用于正序电源模型和对称分量法。但在发生单相接地故障时要求考核相电压，由于分布的新能源电源可能与不对称故障的电气距离很近，从而在并网端难以保持三相高度对称，故相电压无法直接转换成正序电压，使得正序电源模型的动态补偿值无法仅跟踪正序电压得到，又由于正负序的耦合关系，负序电压无法从数值上反映相电压的变化，使得正序电源模型只能根据负序电压模糊地调整正序输出值，无法满足相电压的考核要求。

(4) 新型配电网存在普遍的三相负荷不对称情况，使得接入其中的逆变型电源并网点同样三相不对称，而线电压难以同时反映正序和负序量，即无法量化现实的不对称情况，且难以用序分量来识别或反映出低压相或重载相，需要使用相电压指标和相分量来描述。

1.2 ALVRT 的设计思路

为了解决上述问题，同时为基于相分量的逆变型电源故障计算模型提供建模基础，本文对现有 LVRT 规范作改进完善，设计的相电压下的 ALVRT 规范方案如图 1(b)所示，设计思路如下所述。

(1) 正常运行时，设置轻微不对称裕度，电压等级越高不对称裕度应当越小。例如，110 kV 及以下系统的相电压在 0.9~1.1 p.u.区间内均为正常，与国标规定的 IIDG 电压稳定要求一致；220 kV 系统的

相电压在 0.95~1.05 p.u. 区间内为正常, 取决于相应电压等级下的电压波动要求。

(2) 短时运行上限: 对于当前研究的配电网, 由于中性点采用不直接接地方式, 发生不对称故障时非故障相的电压会升高, 故允许相电压短时间超过 1.1 p.u.。而对于本文所提的发电主体接入输电网场景, 即大电流接地系统, 由于中性点直接接地, 在采用不对称低压穿越后, 发生故障时不会出现非故障相电压升高的情况, 因此不考虑短时运行上限。

(3) 故障运行下限: 为应对单相低压情况, 相电压的运行下限中不设置原线电压指标中的“0.2 p.u. 段”。根据国标, 设定 1.2 倍额定值的相电流阈值, 则使得单相电压最低点为 0 的最低无功补偿系数为 1.3(两位有效数字), 即满足式(1)。

$$\begin{cases} I_p = \sqrt{I_{\max}^2 - I_q^2} = 0 \\ I_q = K_Q \times (0.9 - 0(U_{\min})) \times I_{N,i} \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_p 、 I_q 分别为单相输出电流的有功和无功分量; K_Q 为无功补偿系数; $I_{N,i}$ 为单相额定电流; I_{\max} 为相电流阈值; U_{\min} 为相电压最低值, 设为 0。

故障运行下限的时间节点 0.625 s 为零电压故障耐受时间, 此时间可根据实际需要设定合适的值。

(4) 取消按故障类型考核不同电压的规定, 所有故障类型统一考核相电压。对于平衡故障, 虽增加了考核量, 但可以在计算时精确处理三相不平衡的线路及负荷参数。

1.3 ALVRT 规范方案

根据图 1(b), ALVRT 规范设计如下。

(1) IIDG 并网点相电压在 U_1 和 U_2 之间时不脱网连续运行, 且向相应电压跌落相注入无功电流。

(2) 各相注入的无功电流应满足式(2)。

$$\begin{cases} I_{q,i} = 0, & U_{i^*} > 0.9 \text{ p.u.} \\ I_{q,i} \geq 1.3 \times (0.9 - U_{i^*}) \times I_{N,i}, & U_{i^*} \leq 0.9 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $I_{q,i}$ 为 i 相输出电流的无功分量; $i = a, b, c$ 相; U_{i^*} 为并网点相电压标幺值。

新 ALVRT 规范方案较原 LVVRT 规范具有以下优点:

(1) 能够有效应对个别相的大幅度电压跌落情况, 使电源在短时严重不对称情况下仍能不脱网运行, 并且能够输出不对称的无功电流, 从而向故障相提供精准无功支持, 防止对非低压相输出无功, 且无需额外判断故障类型及故障相。

(2) 统一的相分量指标更加明确地给出了不平衡规范, 使得不对称计算的通用模型问题得到解决。

(3) 与文献[20-22]等所研究逆变装置不对称控制策略的设计思路及结果相一致, 具有可操作性, 易于实现。

(4) 虽然在发生三相接地故障时, 由于去除“0.2 p.u. 段”会使电源延迟近 1 s 退网, 但架空线路最常见的故障为单相接地故障, 故新方案所解决的问题使其更有利于新型电力系统的安全可靠运行。

2 逆变型电源的故障计算模型

与以往不同, 未来作为发电主体的新能源电站主要接入输电网, 即大电流接地系统。在大电流接地系统中, 逆变型电源等效为中性点直接接地的压控电流源, 即将电源与并网变压器等效为一个集中元件, 模型的参数可以由 ALVRT 直接得到。

在目前情况下, 逆变型电源主要接入配电网, 即小电流接地系统, 逆变型电源的等效模型需要根据系统中性点的特点进行特殊变换, 适用于未来仍接入配电线路的新能源电源。

2.1 大电流接地系统电源的故障计算模型

根据 ALVRT 规范方案, 可以直接建立逆变型电源的相分量故障模型, 如式(3)所示。此模型为中性点直接接地的压控电流源, 等效逻辑如图 2 所示。

$$\begin{cases} I_{\text{IIDG},i} = I_{\text{IIDG},i} \angle \varphi_{\text{IIDG},i} \\ I_{\text{IIDG},i} = \sqrt{I_{p,i}^2 + I_{q,i}^2} \\ \varphi_{\text{IIDG},i} = \varphi_{U_i} + \arctan(I_{q,i}/I_{p,i}) - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $I_{\text{IIDG},i}$ 为逆变型电源的 i 相输出电流向量, 其幅值和相角分别为 $I_{\text{IIDG},i}$ 和 $\varphi_{\text{IIDG},i}$; $I_{p,i}$ 、 $I_{q,i}$ 分别为 i 相输出电流的有功分量和无功分量; φ_{U_i} 为 i 相并网点电压的相角。

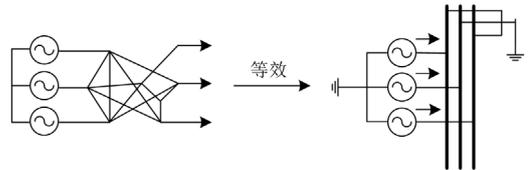


图 2 大电流接地系统的电源等效模型

Fig. 2 Equivalent model of power supply in the high current grounding system

当 U_{i^*} 高于 0.9 p.u. 时, 电源为正常三相对称运行状态, 即 $I_{p,i} = I_{N,i}$ 、 $I_{q,i} = 0$ 。

当 U_{i^*} 低于 0.9 p.u. 时, 电源的 i 相为低压状态, 需进行 ALVRT 计算, $I_{q,i}$ 的值如式(2)所示。

为了在 ALVRT 期间最大化地输出有功功率, 在总输出电流未达到阈值时, 有功输出保持在额定

值；总输出电流达到阈值后，需要牺牲有功来保证无功补偿，即有功输出随无功增加而相应减小。

以 K_Q 取 1.3 为例，当 $I_{N,i}^2 + I_{p,i}^2 = (1.2I_{N,i})^2$ 即 $I_{q,i} = \sqrt{0.44}I_{N,i}$ 时，IIDG 的输出电流达到阈值。则有

$$\begin{cases} I_{p,i} = I_{N,i} \\ I_{q,i} = 1.3 \times (0.9 - U_{i*}) \times I_{N,i} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} I_{p,i} = \sqrt{1.44I_{N,i}^2 - I_{q,i}^2} \\ I_{q,i} = 1.3 \times (0.9 - U_{i*}) \times I_{N,i} \end{cases} \quad (5)$$

当输出电流达到阈值时， $U_{i*} = 0.9 - \sqrt{0.44}/1.3 \approx 0.39$ p.u.，将式(4)和式(5)代入式(3)，即可得到电源的输出表达式，如式(6)和式(7)所示。

$$\begin{cases} I_{IIDG,i} = \sqrt{1 + 1.69 \times (0.9 - U_{i*})^2} \times I_{N,i} \\ \varphi_{IIDG,i} = \varphi_{U_i} + \arctan(1.17 - 1.3 \times U_{i*}) - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (6)$$

当 $U_{i*} < 0.39$ p.u. 时

$$\begin{cases} I_{IIDG,i} = 1.2 \times I_{N,i} \\ \varphi_{IIDG,i} = \varphi_{U_i} + \arctan\left(\frac{1.17 - 1.3U_{i*}}{\sqrt{0.0711 + 3.042U_{i*} - 1.69U_{i*}^2}}\right) - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (7)$$

式(6)和式(7)即为大电流接地系统中电源的故障计算模型。由于 2.2 节中，小电流接地系统电源可以通过虚拟变压器处理为相同形式的等效模型，故可以将式(6)、式(7)看作逆变型电源的通用故障计算模型，本文重点对其进行仿真验证和故障计算。

2.2 小电流接地系统电源的故障计算模型

小电流接地系统的中性点可以看作经一个大阻抗接地。为了使电源的中性点等效接地，从而以注入电流的形式代入系统的节点导纳方程，本文设计了虚拟变压器的思路，对逆变型新能源的模型作等效变换，如图 3 所示。

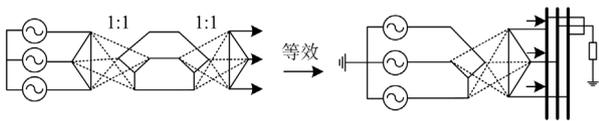


图 3 小电流接地系统电源的等效模型

Fig. 3 Equivalent model of power supply in the low current grounding system

令图 3 中的三相并网点服从 ALVRT 的要求，由此通过虚拟变压器倒推电源的输出电流值，故障

计算时再将虚拟变压器并入无源部分，即可处理为与大电流接地系统电源相同形式的故障计算模型。

虚拟变压器的计算模型如图 4 和表 1 所示。表 1 中， y_l 为无限大励磁电感下的漏导纳。

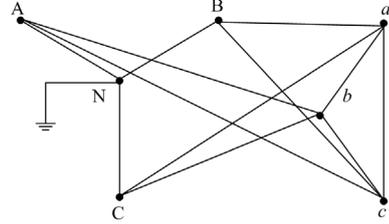


图 4 虚拟变压器的计算模型

Fig. 4 Calculation model of virtual transformer

表 1 虚拟变压器的参数

Table 1 Parameters of virtual transformer

节点间	导纳值
A-N, B-N, C-N	$1 \times y_l$
a-b, b-c, c-a	$1/3 \times y_l$
A-b, B-c, C-a	$-1/\sqrt{3} \times y_l$
A-c, B-a, C-b	$1/\sqrt{3} \times y_l$

若设虚拟变压器为三相对称的理想变压器，联接组别为 Yd11，则式(6)和式(7)变为

$$\begin{cases} I_{IIDG,i} = \sqrt{1 + 1.69 \times (0.9 - U_{i*})^2} \times I_{N,i} \div \sqrt{3} \\ \varphi_{IIDG,i} = \varphi_{U_i} + \arctan(1.17 - 1.3 \times U_{i*}) - \frac{2\pi}{3} \end{cases} \quad (8)$$

当 $U_{i*} < 0.39$ p.u. 时

$$\begin{cases} I_{IIDG,i} = 1.2 \times I_{N,i} \div \sqrt{3} \\ \varphi_{IIDG,i} = \varphi_{U_i} + \arctan\left(\frac{1.17 - 1.3U_{i*}}{\sqrt{0.0711 + 3.042U_{i*} - 1.69U_{i*}^2}}\right) - \frac{2\pi}{3} \end{cases} \quad (9)$$

2.3 仿真实验

为了验证本文设计的逆变型电源故障计算模型能够满足 ALVRT 中无功补偿的要求，本节利用电力系统电磁暂态仿真软件 PSCAD，按照式(6)和式(7)搭建逆变型电源的逻辑控制电路，对图 5 所示的单逆变型电源系统进行仿真，并将结果与无补偿的情况作对比，如图 6 所示。

图 6 中，在 A 相发生单相接地故障时，本文的 ALVRT 故障模型相比于无补偿的情况，能够有效地提升故障相的电压，满足低压穿越的要求，验证了本文设计的逆变型电源故障计算模型的有效性。

值得注意的是，相分量的建模方式使得逆变型

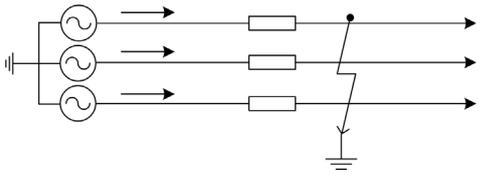


图5 单电源系统

Fig. 5 Single power supply system

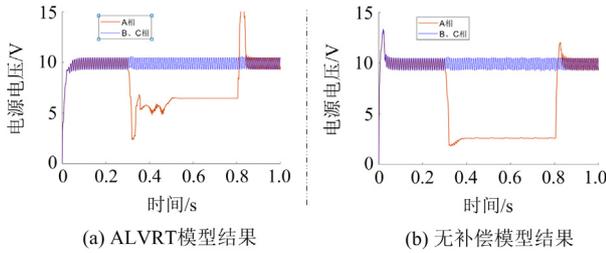


图6 单电源系统的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of single power supply system

电源能够只对故障相施加无功补偿，即不对称地输出电流，从而能够正确和精确处理三相不对称的各类情况，这是传统正序模型所不具备的功能。另外，图5采用单逆变型电源的系统，可以等效为全比例逆变型电源的系统，验证了所建模型能够满足引言中提到的“无新能源比例限制，在全比例新能源供电时均能够满足低压穿越和无功补偿”要求。

3 新型电力系统的相分量故障计算方法

由于变压器、输电线路和用户负载等传统环节已存在成熟的相分量计算模型，为了方便且有针对性地说明新型电力系统的相分量故障计算方法，本节将不同电压等级的电力系统元件简化为同一电压等级下的网络元件来说明，不再具体分析各传统环节^[24]。对实际含变压器的多电压等级电力系统进行计算时，将各传统环节的相分量模型直接套入本文故障算法即可。

本节主要分析大电流接地系统的故障计算，对于采用小电流接地方式的配电网，用中性点经一个大阻抗接地来近似等效后，套入本节方法即可。值得一提的是，小电流接地系统的故障电流本质上是由线路对地电容电压突变引起的，其值很小，且不是由电源提供的，本节不再赘述。

3.1 故障计算流程

本节基于前文建立的逆变型电源的故障计算模型，面向新型配电网设计了一套相分量故障计算方法，故障计算流程如图7所示。

3.1.1 相导纳矩阵

以图8所示的系统模型为例，建立相导纳矩阵

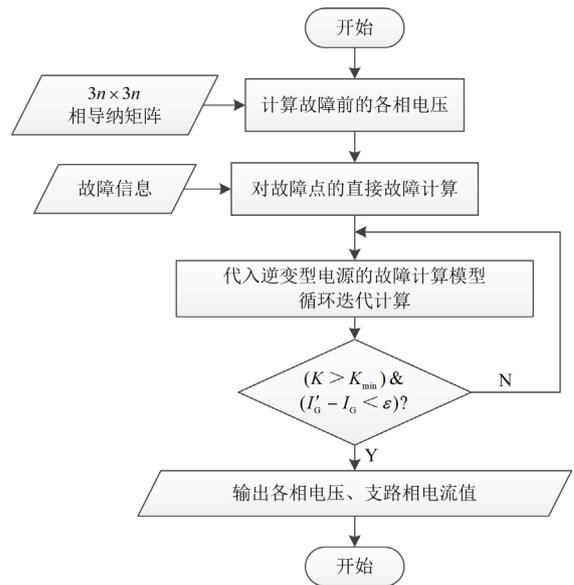


图7 面向新型电力系统的故障计算流程

Fig. 7 Fault calculation flow of the new power system

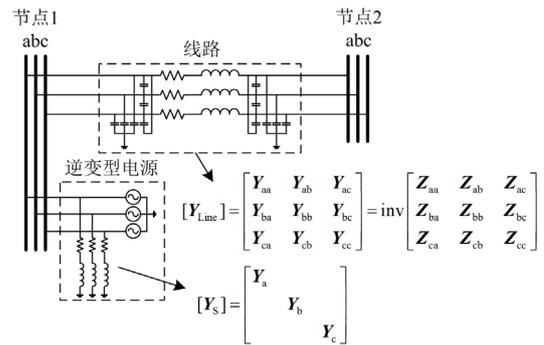


图8 系统模型示例

Fig. 8 Example of system model

Y ，如式(10)所示。

$$[Y] = \begin{bmatrix} [Y_{Line}] + [Y_S] & -[Y_{Line}] \\ -[Y_{Line}] & [Y_{Line}] \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中： Y_{Line} 为图8所示线路参数的相导纳矩阵； Y_S 为逆变型电源参数的相导纳矩阵。

对于序分量形式表示的电气量，需转换为相分量形式，如式(11)所示。

$$\begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} & 1 \\ e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_+ \\ F_- \\ F_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中：电气量 F 表示电压或电流向量；下标“+”、“-”和“0”分别表示正、负和零序分量。

对于序分量表示的三相输电线路，通过式(12)转换为相分量形式。相比之下，相参数矩阵能够直

观地设置线路的不对称耦合参数。相参数的导纳矩阵可由阻抗矩阵求逆得到。为了方便设置不对称的线路参数,本文算例忽略短线路的耦合电容,保留长线路的相间与对地电容。

$$\begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} Z_+ + Z_- + Z_0 & e^{j240^\circ} Z_+ + e^{j120^\circ} Z_- + Z_0 & e^{j120^\circ} Z_+ + e^{j240^\circ} Z_- + Z_0 \\ e^{j240^\circ} Z_+ + e^{j120^\circ} Z_- + Z_0 & Z_+ + Z_- + Z_0 & e^{j120^\circ} Z_+ + e^{j240^\circ} Z_- + Z_0 \\ e^{j120^\circ} Z_+ + e^{j240^\circ} Z_- + Z_0 & e^{j120^\circ} Z_+ + e^{j240^\circ} Z_- + Z_0 & Z_+ + Z_- + Z_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, Z 表示相应相之间的阻抗向量。

将电力系统分为有源部分和无源部分,其中,有源部分包括传统型电源和新型的逆变型电源,无源部分使用图8和式(10)所示方法建立相导纳矩阵,记为 Y ,则电力系统的分析模型如图9所示。图9中: I_s 表示传统型电源电流向量; I_3 表示逆变型电源电流向量。

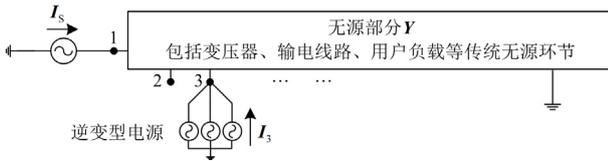


图9 电力系统的分析模型

Fig. 9 Analysis model of power system

根据电路理论,建立 n 节点系统的 $3n \times 3n$ 电流-电压方程,如式(13)所示,即可计算出故障前的各相电压。

$$\begin{bmatrix} I_s \\ 0 \\ I_3 \\ \vdots \end{bmatrix} = [Y] \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.1.2 直接故障计算

故障信息包括故障位置、故障类型和过渡电阻。过渡电阻属于无源部分,首先将其并入相导纳矩阵中,得到新的矩阵记为 Y' ,然后根据故障类型选择对应的处理方法,分为接地故障、相间故障、断线故障和复杂故障。直接故障计算中逆变型电源输出为其额定值。

(1) 接地故障

接地故障的每个故障相视为增加一个零电位的相节点,故障电流视为注入这个相节点的“故障电源”。以单相接地故障为例进行分析,设节点 k 的 c 相发生接地故障,新增相节点记为 f ,过渡电阻的导纳值为 Y_f ,故障电流向量为 I_f ,如图10所示。

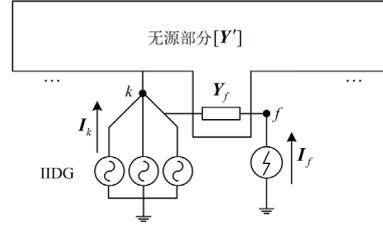


图10 单相接地故障分析示例

Fig. 10 Example of single-phase grounding fault analysis

则有

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ I_{k,a} \\ I_{k,b} \\ I_{k,c} \\ I_f \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots Y_{k,aa} & Y_{k,ab} & Y_{k,ac} & 0 & \cdots \\ \cdots Y_{k,ba} & Y_{k,bb} & Y_{k,bc} & 0 & \cdots \\ \cdots Y_{k,ca} & Y_{k,cb} & Y_{k,cc} + Y_f & -Y_f & \cdots \\ \cdots 0 & 0 & -Y_f & Y_f & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ U'_{k,a} \\ U'_{k,b} \\ U'_{k,c} \\ "0" \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, U' 表示变化后的对应相节点电压向量。

根据矩阵运算法则,可删去式(14)中“0”所在的行和对应的列,这样就消去了等号左边的未知量 I_f ,对得到的等式求解即可得到各相电压。将电压结果回代式(14)即可得到故障电流,如式(15)所示。
 $I_f = \cdots + 0 + 0 + (-Y_f) \times U'_{k,c} + 0 + \cdots = -Y_f \times U'_{k,c}$ (15)

对于两相及以上的接地故障,将每个故障相分别按上述方法处理,然后叠加即可。

(2) 相间故障

当计及过渡电阻时,将 Y' 代入式(13)即可计算出各相电压,无需特殊处理。当计算无过渡电阻的理想情况时,需将等电位的短路点合并计算。以两相短路故障为例,设节点 k 的 a 相和 b 相短路,记 a 相到 b 相短路电流为 I_f ,则两相的等效电源为

$$\begin{cases} I'_{k,a} = I_{k,a} - I_f \\ I'_{k,b} = I_{k,b} + I_f \end{cases} \quad (16)$$

式中, I' 表示变化后的对应相节点电流向量。

将式(16)代入式(13),然后将两短路点合并,这样就消去了等号左边的 I_f ,如式(17)所示。通过式(17)即可得到各相电压,故障电流如式(18)所示。

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ I_{k,a} + I_{k,b} \\ I_{k,c} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{k,aa} + Y_{k,bb} + Y_{k,ab} + Y_{k,ba} & Y_{k,ac} + Y_{k,bc} & \vdots \\ Y_{k,ca} + Y_{k,cb} & Y_{k,cc} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ U'_{k,a} = U'_{k,b} \\ U'_{k,c} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$I_f = I_{k,a} - \cdots - Y_{k,aa} U'_{k,a} - Y_{k,ab} U'_{k,b} - Y_{k,ac} U'_{k,c} - \cdots = \cdots + Y_{k,ba} U'_{k,a} + Y_{k,bb} U'_{k,b} + Y_{k,bc} U'_{k,c} + \cdots - I_{k,b} \quad (18)$$

对于三相短路故障, 将式(16)变为式(19), 用同样的合并思路计算求解。

$$\begin{cases} I'_{k,a} = I_{k,a} - I_{f,ab} + I_{f,ca} \\ I'_{k,b} = I_{k,b} + I_{f,ab} - I_{f,bc} \\ I'_{k,c} = I_{k,c} + I_{f,bc} - I_{f,ca} \end{cases} \quad (19)$$

(3) 断线故障

在断线故障的断点处设置新的相节点, 然后相应修改相导纳矩阵, 将修改后的导纳矩阵代入式(13)即可计算出各相电压。

(4) 复杂故障

当同时发生包括多种故障类型的复杂故障时, 只需对各故障分别按上述对应的方法处理, 然后叠加即可。

3.1.3 电源模型的循环迭代计算

将直接故障计算所得的各相电压作为并网相电压的初始量, 按照式(6)和式(7)计算出逆变型电源的输出电流, 然后将电流结果代入直接故障计算中建立的矩阵方程, 修正等号左边的各电源电流值, 计算得到新的各相电压。循环迭代直到满足终止条件, 即可得到故障计算的各相电压结果。将电压结果代入式(15)或式(18)即可得到故障相的电流值。

迭代终止条件设定为同时满足 $K > K_{\min}$ 和 $I'_G - I_G < \varepsilon$ 。其中, K 为迭代次数, K_{\min} 为最少迭代次数, 避免因迭代次数过少而失真; “ $I'_G - I_G$ ”表示电源输出电流迭代前后差值, ε 为迭代精度。值得注意的是, 低压状态时 “ $I'_G - I_G$ ” 会随着迭代次数增加而越来越小, 但不可能变为 0, 故最终的电压结果只能说是 “接近稳定”, 在足够多的迭代次数后仍会以较小的数值增长, 因此, 设置一个合适的 K_{\min} 或 ε 值即可。

3.2 算例验证

本文模型及故障计算方法适用于不平衡电网, 而当前的正序模型及算法只能准确计算平衡电网, 不能正确处理近电源的不对称故障和不对称负荷。为了方便且有针对性验证本文所提方法的正确性, 以图 11 所示单电压等级新型电力系统为算例进行验证, 不再计算已经成熟的传统无源环节。为突出本文算法计算不平衡电网的优势, 设置负荷和部分线路为不对称; 为突出本文解决了近电源不对称故障的计算问题, 设置故障类型为严重不对称的单相金属性接地故障和两相短路故障。本小节按照 3.1 节的流程在 Matlab 上对算例进行编程计算, 并利用 PSCAD 对算例进行仿真, 将计算结果同仿真结果相比较, 来验证所提算法的正确性。仿真模型与 ALVRT 控制框图见附录 A。

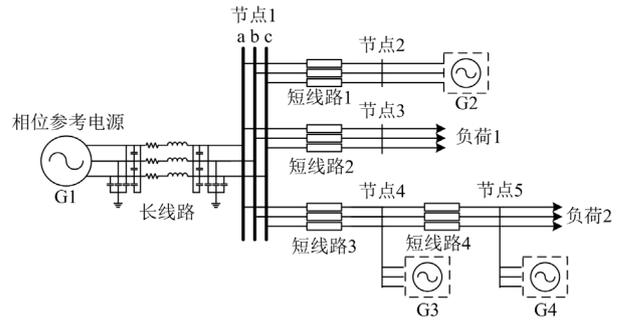


图 11 算例模型

Fig. 11 Example model

其中, 电源 G1 为相位参考电源, 电势为 10 kV, G2—G4 的额定功率分别为 10、6 和 5 MW, 长线路的正负序阻抗和零序阻抗分别为 $j0.1 \Omega$ 和 $j0.25 \Omega$ 。短线路 1、2 和 3 设为平衡线路, 阻抗为 $(0.5 + j1) \Omega/\text{km}$, 长度分别为 0.5、2 和 1 km; 短线路 4 设为不平衡线路, 三相阻抗分别为 $(2 + j4.4) \Omega$ 、 $(2.4 + j4) \Omega$ 和 $(2.4 + j4.8) \Omega$ 。负荷 1 的三相负荷分别为 $(1 + j0.5)$ 、 $(2 + j0.1)$ 和 $(1.5 + j0.5)$ MVA, 负荷 2 的三相负荷分别为 $(3 + j1.5)$ 、 $(4 + j0.1)$ 和 $(2 + j1)$ MVA, 使用 ZIP 综合负荷模型获取负荷阻抗值 Z_{Load} , 如式(20)所示, 设定负荷在短时故障期间阻抗值不变。

$$Z_{\text{Load}} = \frac{U_{\text{Load}}^2}{P_{\text{Load}} - jQ_{\text{Load}}} \quad (20)$$

式中: U_{Load} 取算例系统的电压等级, 为 10 kV; P_{Load} 和 Q_{Load} 分别表示有功负荷量和无功负荷量。

算例 1: 节点 4 的 b 相发生单相接地故障, 过渡电阻为 0.01Ω , 仿真的故障起止时间分别为 0.3 s 和 0.8 s, 记录点为 0.6 s。经 Matlab 编程计算和 PSCAD 仿真的结果如表 2 所示。

算例 2: 节点 4 的 a、c 相发生两相短路故障, 无过渡电阻, 计算与仿真结果如表 3 所示。

由表 2 和表 3 可得, 使用本文算法所得的各相电压结果与仿真软件内部算法所得结果的幅值相对误差较低, 角度误差较小, 即本文算法与软件内部算法的结果近似拟合, 验证了本文所提故障计算方法的有效性。但故障关联相的结果较非故障相有明显的误差, 如表 1 中节点 5 的 b 相、表 2 中节点 5 的 a 和 c 相。除基数小的原因外, 造成此误差的原因如下: 由于逆变型电源在低压状态下不断输出无功电流, 使得故障相的电压值受无功补偿而不断增长, 其并非一个收敛稳定的值, 又由于计算中 K_{\min} 或 ε 值所反映的实际故障时间难以与仿真时间 0.3 s 所反映的实际故障时间完全对应, 从而导致故障相电压的计算和仿真结果出现一定的偏差。可以看出,

离故障点越远这种误差就越明显，即逆变型电源的无功补偿作用效果就越大。

表 2 算例 1 的计算与仿真结果

Table 2 Calculation and simulation results of Example 1

节点	相	计算结果	仿真结果	幅值相对 误差/%
		(电压/kV, 电流/kA)	(电压/kV, 电流/kA)	
1	a	10.0022∠2.7524°	9.9652∠2.7882°	0.37
	b	8.9317∠-123.0232°	8.9287∠-122.9552°	0.03
	c	10.3249∠119.2960°	10.3032∠119.2388°	0.21
2	a	10.1424∠4.4062°	10.1061∠4.4658°	0.36
	b	9.0715∠-121.1708°	9.0709∠-121.0660°	0.01
	c	10.4652∠120.8980°	10.4439∠120.8427°	0.06
3	a	9.8050∠1.9094°	9.7661∠1.9482°	0.20
	b	8.7331∠-125.2084°	8.7282∠-125.1511°	0.06
	c	10.0701∠117.8988°	10.0467∠117.8349°	0.07
4	a	10.0526∠5.0667°	9.9900∠5.2396°	0.23
	b	0.0855∠172.0689°	0.0755∠170.9444°	11.70
	c	10.4603∠121.8342°	10.3986∠121.9092°	0.59
5	a	9.4689∠6.7046°	9.3764∠7.1206°	0.98
	b	1.5107∠-154.0982°	1.3565∠—	10.21
	c	10.2323∠125.1580°	10.0988∠125.5624°	1.30
故障电流		8.5489	8.1280	4.92

注：“∠—”表示无法从仿真软件读出一个接近稳定的角度值。

表 3 算例 2 的计算与仿真结果

Table 3 Calculation and simulation results of Example 2

节点	相	计算结果	仿真结果	幅值相对 误差/%
		(电压/kV, 电流/kA)	(电压/kV, 电流/kA)	
1	a	9.3276∠1.0855°	9.3616∠1.3285°	0.36
	b	9.9550∠-119.5929°	9.9335∠-119.5615°	0.22
	c	9.6321∠116.3584°	9.5874∠116.0044°	0.46
2	a	9.4685∠2.9797°	9.5023∠3.1122°	0.36
	b	10.0951∠-117.9315°	10.0738∠-117.8885°	0.21
	c	9.7722∠118.0761°	9.7275∠117.7099°	0.46
3	a	9.1437∠0.2425°	9.1753∠0.4915°	0.35
	b	9.7336∠-121.7788°	9.7123∠-121.7514°	0.22
	c	9.3944∠114.9613°	9.3466∠114.5948°	0.51
4	a	5.4480∠58.0568°	5.5955∠55.1143°	2.71
	b	10.0605∠-118.1451°	10.0396∠-118.0916°	0.21
	c	5.4480∠58.0568°	5.5955∠55.1143°	2.71
5	a	6.1157∠50.4124°	6.1728∠43.918°	0.93
	b	9.7691∠-120.3369°	9.7497∠-120.2486°	0.20
	c	6.4085∠50.8110°	6.5109∠44.9148°	1.60
故障电流		7.1735	7.0527	1.68

除上述的模型误差外，由于本文提出的是新的故障计算模型，其用到的诸多元件及逻辑在仿真软件中无现成的理想模型，需要进行大量换算，故会造成舍入误差和观测误差，具体如下所述。

(1) 由于配电网的复杂负荷并非本文研究对象，故在短时故障期间对负荷采用恒定阻抗模型，使得

在仿真中换算的等效阻抗值存在舍入误差。

(2) 感抗等包含 π 的换算、极坐标形式与 $a+jb$ 形式的换算存在的舍入误差。

(3) 当电压较低或系统较复杂时，仿真软件中电气量的波形容易出现波动，会造成观测误差。

综合上述分析，本文算法使用矩阵形式进行运算，模型统一，易处理大数据量，具有针对性强、灵活和兼容等优点，能够应对新型电力系统的各类故障情况，尤其是逆变型电源的正序计算模型及对称分量法难以解决的三相不对称问题。

通过算例可以验证，本文所提算法能够有效地对新型电力系统的近电源不对称故障进行计算，解决了当前故障计算模型的瓶颈，并且还可以计算负荷不对称时近负荷电源的无功补偿，具有通用性，满足引言中提到的三点要求，为新型电力系统的保护与控制提供基础理论依据。

4 结论

本文研究了逆变型电源的不对称故障计算模型，进而设计了一套面向新型电力系统的相分量故障计算方法。具体结论如下所述。

(1) 原 LVRT 规范在处理近电源不对称故障时存在诸多问题，本文将其改进完善为新 ALVRT 规范方案，基于新规范的逆变型电源模型能够不对称地输出电流，可以对低压相精准输出无功支持，防止对非低压相输出无功。使用相分量模型 ALVRT 是建立逆变型电源故障计算模型的前提。

(2) 相比于逆变型电源的传统正序模型，本文设计的故障计算模型满足新型电力系统发生不对称故障时对电源的要求，符合先进的控制策略，同时也体现了逆变型电源相比于同步发电机的灵活性特征。

(3) 本文设计的面向新型电力系统的故障计算方法是基于相分量法，从而可以计算不平衡网络并精确处理各不平衡量，且本算法具有通用性，可以兼容各传统电力环节的相分量计算模型，并能准确定量计算逆变型电源的不对称无功补偿。

(4) 在新型电力系统惯性缺乏和不平衡问题突出的背景下，有必要建立逆变型电源的三相不对称无功补偿体系，而本文设计的 ALVRT 给出了规范方案。

附录 A

正文 3.2 节中算例的仿真模型如图 A1 所示，ALVRT 控制框图如图 A2 所示。

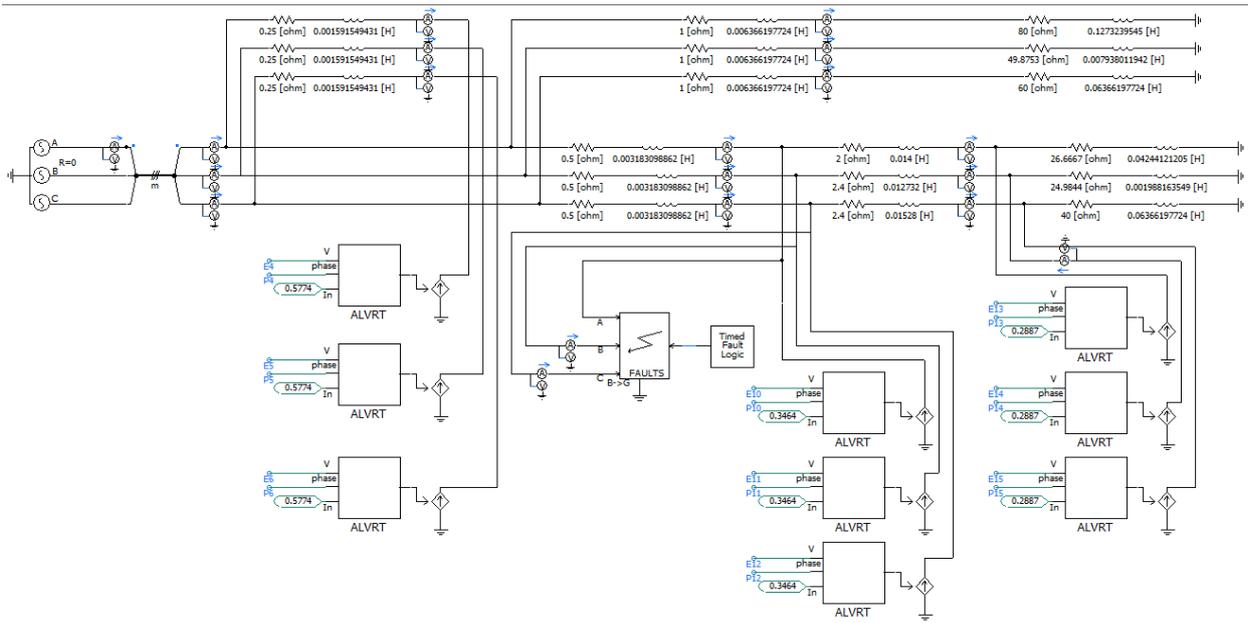


图 A1 仿真模型

Fig. A1 Simulation model

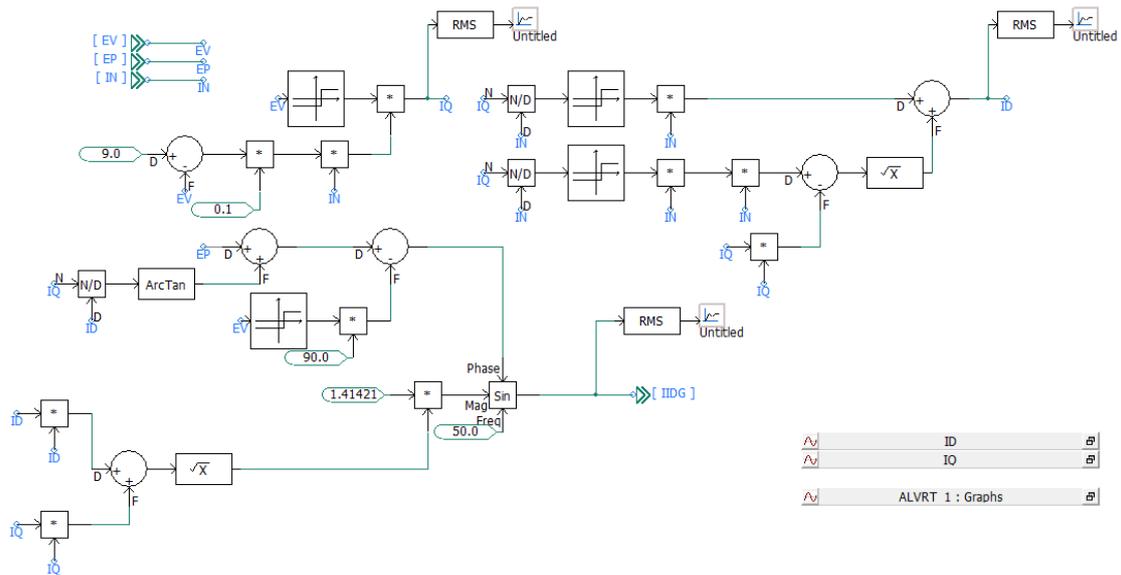


图 A2 ALVRT 控制框图

Fig. A2 Control block diagram of ALVRT

参考文献

[1] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.
 LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE,

2023, 43(2): 555-581.
 [2] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.
 WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection

- and Control, 2023, 51(6): 10-20.
- [3] 刘向军, 周凯, 孙毅, 等. 面向新型电力系统的边缘缓存与计算资源迁移策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 134-142.
LIU Xiangjun, ZHOU Kai, SUN Yi, et al. Edge cache and computing resource migration strategy for new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 134-142.
- [4] 周原冰, 杨方, 余潇潇, 等. 中国能源电力碳中和实现路径及实施关键问题[J]. 中国电力, 2022, 55(5): 1-11.
ZHOU Yuanbing, YANG Fang, YU Xiaoxiao, et al. Realization pathways and key problems of carbon neutrality in China's energy and power system[J]. Electric Power, 2022, 55(5): 1-11.
- [5] 张政伟, 陈谦, 牛应灏, 等. 基于实时生成定值的高比例新能源电网自适应电流保护[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 137-146.
ZHANG Zhengwei, CHEN Qian, NIU Yinghao, et al. Real-time generated protection settings based adaptive current protection for transmission line considering high proportion of new energy source[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 137-146.
- [6] 韩璐, 尹纯亚, 戴晨, 等. 高比例新能源送端系统暂态电压运行风险分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 23-34.
HAN Lu, YIN Chunya, DAI Chen, et al. Transient voltage operational risk of a high-proportion new energy sending system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 23-34.
- [7] 孙大雁, 耿建, 杨胜春, 等. 新型电力系统环境下煤电与新能源等多元资源协调优化运行及其挑战[J]. 电网技术, 2024, 48(8): 3105-3113.
SUN Dayan, GENG Jian, YANG Shengchun, et al. Challenges of coordinated and optimized operation of coal power and new energy and other diversified resources in new power system[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3105-3113.
- [8] 丁磊, 郭一忱, 鲍威宇, 等. 能量视角下的电力系统惯量[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(8): 3-13.
DING Lei, GUO Yichen, BAO Weiyu, et al. Inertia of power systems from energy perspective[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(8): 3-13.
- [9] 罗美玲, 马英, 黄伟兵, 等. 计及电压幅值检测延时及相位跳变的 IIDG 故障电流解析计算[J]. 中国电力, 2024, 57(2): 72-81.
LUO Meiling, MA Ying, HUANG Weibing, et al. IIDG fault current analysis and calculation considering voltage amplitude detection delay and phase jump[J]. Electric Power, 2024, 57(2): 72-81.
- [10] 王守相, 江兴月, 王成山. 含分布式电源的配电网故障分析叠加法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 38-42.
WANG Shouxiang, JIANG Xingyue, WANG Chengshan. A superposition method of fault analysis for distribution systems containing distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 38-42.
- [11] 戴志辉, 李川, 焦彦军. IIDG 低压穿越模型及其在配电网故障分析中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(7): 16-23.
DAI Zhihui, LI Chuan, JIAO Yanjun. Low-voltage ride through model of inverter-interfaced distributed generator and its application to fault analysis of distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(7): 16-23.
- [12] 杨杉, 同向前. 含低电压穿越型分布式电源配电网的短路电流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 93-99, 151.
YANG Shan, TONG Xiangqian. Generators with capability of low voltage ride through[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 93-99, 151.
- [13] 周念成, 叶玲, 王强钢, 等. 含负序电流注入的逆变型分布式电源电网不对称短路计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 41-49, 8.
ZHOU Niancheng, YE Ling, WANG Qianggang, et al. Asymmetric short-circuit current calculation for inverter interfaced distributed generators with negative sequence current injection integrated in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 41-49, 8.
- [14] 吴争荣, 王钢, 李海锋, 等. 含分布式电源配电网的相间短路故障分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 130-136.
WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Analysis on the distribution network with distributed generators under phase-to-phase short-circuit faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 130-136.
- [15] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [16] 谭会征, 李永丽, 陈晓龙, 等. 带低电压穿越特性的逆变型分布式电源对配电网短路电流的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 31-37, 52.
TAN Huizheng, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Influence of inverter-interfaced distributed generator with low-voltage ride-through capability on short circuit current

- of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 31-37, 52.
- [17] 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.
- [18] 徐玉琴, 杨浩, 李鹏. 含逆变型分布式电源的小电阻接地方式配电网单相接地故障分析[J]. 电测与仪表, 2018, 55(16): 57-63, 71.
XU Yuqin, YANG Hao, LI Peng. Earth fault analysis on low resistance grounded distribution network with inverter interfaced distribution generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(16): 57-63, 71.
- [19] 徐岩, 邹南, 马天祥. 逆变型分布式电源接入配电网单相断线故障零序电压分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 41-51.
XU Yan, ZOU Nan, MA Tianxiang. Analysis of zero-sequence voltage of a single-phase disconnection fault of inverter interfaced distributed generation connected to a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 41-51.
- [20] SHABESTARY M M, MOHAMED Y A I. Asymmetrical ride-through and grid support in converter-interfaced DG units under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1130-1141.
- [21] 常仲学, 杨忠礼, 宋国兵, 等. 正负双序独立控制策略下的逆变型分布式电源不对称故障电流分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 44-51.
CHANG Zhongxue, YANG Zhongli, SONG Guobing, et al. Analysis on asymmetric fault current characteristics of inverter interfaced distributed generator under positive-sequence and negative-sequence current respective control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 44-51.
- [22] 李红, 栗时平, 唐铭泽, 等. 不对称故障下考虑电压跌落程度的新能源逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 21-32.
LI Hong, SU Shiping, TANG Mingze, et al. Control strategy of renewable energy inverter considering voltage sag degree under asymmetric faults[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 21-32.
- [23] 陈琪蕾, 范忻蓉, 张沛超, 等. 逆变型分布式电源的灵活正负序电流控制方法与等值序网模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 57-62.
CHEN Qilei, FAN Xinrong, ZHANG Peichao, et al. Flexible positive and negative sequence current control strategy and equivalent sequence network model of inverter interfaced distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 57-62.
- [24] 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.
- [25] 沈政委, 孙华东, 汤涌, 等. 传统交流电网与高比例新能源电网连锁故障差异性分析[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4641-4649.
SHEN Zhengwei, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Analysis of cascading failure differences between traditional AC power grid and high-proportion new energy power grid[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4641-4649.
- [26] 徐式蕴, 王一鸣, 孙华东, 等. 国外新能源脱网事故对中国电网安全稳定运行的启示[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(13): 1-8.
XU Shiyun, WANG Yiming, SUN Huadong, et al. Insights from renewable energy outage accidents abroad for secure and stable operation of power grids in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(13): 1-8.

收稿日期: 2024-01-10; 修回日期: 2024-06-23

作者简介:

汤先航(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与计算; E-mail: tangxianhang120@126.com

莫仕勋(1970—), 男, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: mo_shixun@gxu.edu.cn

(编辑 魏小丽)