

基于电力传输系统与云端协同的 电网故障检测和隔离方法

王良毅 郭嘉琛 孙晓勇 汤未 张航

国网重庆市电力公司

摘要：提出了一种基于电力传输系统与云端协同的配电网故障检测和隔离方法。使用正交频分复用（OFDM）估计源来对输电系数进行在线估计，并通过无线传输技术将数据传输至云端服务器。在云端服务器上，对配电系统的状态信息进行处理和分析，获得配电系统的故障特征，并生成故障预警信息。此外提出了一种处理复杂网络（如总线网络）的方法，它可以将复杂网络分解为几个Y形子网络。通过监控这些子网来进行故障的检测与隔离。实验结果表明，该方法可以实现对配电系统故障进行快速检测和隔离，能够显著提高配电系统的故障处理能力和扰动抗干扰能力，保证配电系统的安全稳定运行。

关键词：配电网故障检测；云端协同；正交频分复用估计；复杂网络处理

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.07.080

引言

为了解决传统方法在处理复杂网络和提高故障处理能力方面存在的问题^[1]，本文提出了一种基于电力传输系统与云端协同的电网故障检测和隔离方法。首先，本文采用正交频分复用（OFDM）技术^[2]来估计输电系数，以提高对配电系统实时状态的准确估计。然后，通过无线传输技术将数据传输至云端服务器，在云端服务器上进行数据分析和处理^[3]，实现对配电系统的故障特征提取和故障预警信息的生成。此外，本文还提出了一种处理复杂网络的方法，即将复杂网络分解为几个Y形子网络，并通过监控这些子网来实现故障的检测与隔离。

一、Y型总线网络分解

（一）网络拓扑结构

网络拓扑是各种电子设备（即电子控制单元ECU、传感器、执行器等）之间连接的一种几何形式。网络拓扑可以分为两类，包括物理拓扑和逻辑拓扑。物理拓扑表示网络中电子设备的物理互连，而逻辑拓扑则表示通过网络的数据流。

除了总线拓扑之外，其他拓扑结构中ECU之间通过建立点对点连接来进行通讯。电子设备在电力系统设备中的大规模部署，将会导致电子控制单元之间的点对点连接迁移到电力通信系统中的总线网络上。

（二）用于故障检测和隔离的混合网络分解

在电力传输系统中，通信网络是混合网络，结合了环形子网络、点到点子网络和总线子网络，如图2所示。每个子网络均可以被单独地监控，且网络中的任何ECU都能够估计给定源与其自身之间的传输系数。在故障检测和隔离过程中，每个ECU均可以作为源或者接收器。

当ECU充当源时，其被标记为 S_i 。而当ECU充当第 i 个源的第 j 个接收器时，则被标记为 R_{ij} 。ECU的标签取决于子网络的拓扑结构：

对于点到点的子网络，选择一个ECU作为源，另一个作为接收器。源于接收器的选择顺序并不需要考虑，因为两个ECU之间的传输系数可以被估计。

对于环形子网络，ECU既作为源也作为接收器，以形成点到点的子网络。

二、Y型总线网络模型

为了实现电力传输系统之间的通信目的，首先需要在传输系统中在线估计源和接收器之间的传输系数。本

文所提出的故障检测与隔离方法是以监测这些给定的传输系数为基础的。在本节中，网络建模有两个目的，一是研究传输系数对由附加阻抗表示的故障的理论敏感性，二是生成应用部分中使用的模拟传输系数。由于总线网络可以分解为几个Y形网络，因此本节在建立模型时对分解后的若干Y形网络进行建模，称为传输链矩阵模型。

(一) 传输线模型

基于传输链矩阵的确定性模型用于对网络的源和每个接收器之间的信道进行建模。定义传输线的长度为 l 、特性阻抗为 Z_c 、传播常数为 γ ，可视其为双端口网络，如图1所示。线路输出端处的电压 U_2 和电流 I_2 通过传输链矩阵 M 与线路输入端处的电压 U_1 和电流 I_1 相连。

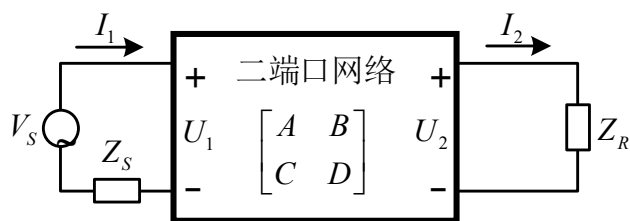
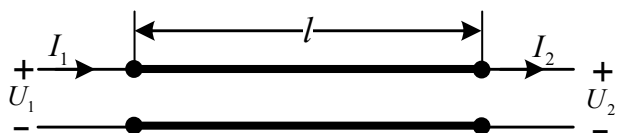


图1 传输线的双端口网络模型

(二) Y形网络传输系数计算

电力传输系统的总线网络可以分解为若干个Y形网络，其结构如图2所示。它由一个虚构/真实的源、两个真实或虚构的接收器 (R_a 和 R_b)、一个节点和三个分支组成。源和两个接收器均使用ECU，其中一个用来发送信号，另两个用来接收所发送的信号。由于同时发生多个故障超出了本文所提方法的判断范围，因此假设故障仅发生在长度为 l_0 的分支 B_s 、长度为 l_a 的 B_a 和长度为 l_b 的 B_b 中的一个分支中，因此以下使用链矩阵模型

研究网络的四种情况，包括三种故障状况与健康情况。

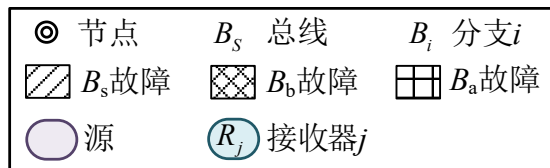
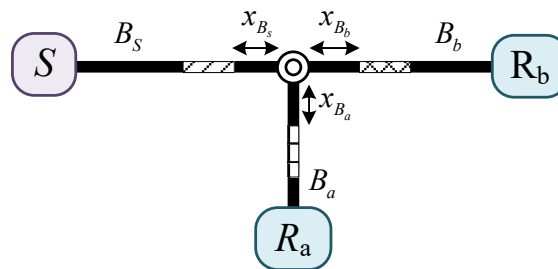


图2 分解后Y形子网络结构图

三、基于云端协同的故障检测与隔离方法

将电力传输系统的总线网络分解后的Y形子网络由一个节点、三个ECU和三个分支组成，如图2所示。为了相互通信，电子控制单元之间通过云端平台进行数据传输，这样在实现数据传输的同时也实现了数据收集。这三个ECU中的一个表示为源 S ，另外两个表示接收器 R_i ，其中 $i \in \{a; b\}$ 。

在数据处理阶段，可以通过PLC使用正交频分复用 (OFDM) 方法来估计源 S 和接收器 R_i 之间的传输系数。在数据传输阶段，PLC通信分两步进行，第一步是发送源和接收器将数据传输到云端平台，第二步是将估计出的传输系数发送给各个ECU。在云端平台中还会根据得到的数据就行故障检测，只有在判定无故障发生的状态下，下一步才会估计传输系数。

基于此本文提出了一种新的故障检测和隔离方法。通过无线传输将数据传输至云端服务器进行分析和处理。在云端服务器上，通过对配电系统状态信息的处理和分析，能够快速准确地检测出故障，并生成相应的故障预警信息。通过每个接收器处的参考传输系数与在线计算的传输系数，可以得到对应接收器的健康指数 (HI)。使用该指数可以进一步计算对应的残差，并且这些残差会受到对应分支中发生的故障的影响。因此，可

以通过分析残差集的特征来定位故障。

无论是健康状态的传输网络还是有故障情况下的传输网络，其传输系数均可以通过2.2节中的方法进行计算，从而可以得到对应状态下的健康指数。

健康指数的大小取决于故障的严重程度，由其阻抗 Z_f 、接收器与节点间的距离 x_{B_i} 表示。

对于复杂的电力传输网络，将其分解后通过OFDM方法来估计每一对ECU之间的每个分支的传输系数，由此可以得到该分支对应的HI值。如果计算的HI值偏离零，则该分支被视为有故障，且可以在不需要其他信息的情况下隔离有故障的分支。

当不存在故障时，由式(10)可知HI指标值均为0，若故障存在时，无论在何处发生了故障，HI指标值均不为0。为了定位故障所发生的位置，定义如表1所示的特征矩阵：若两个HI指标值相等则定义将其均定义为1，若两个HI指标值不相等则将其均定义为0。

表 1 Y形网络特征矩阵

	故障 B_s	故障 B_a	故障 B_b
$\max(I_{R_i})$	$I_{R_a} = I_{R_b}$	I_{R_a}	I_{R_b}
I_{R_a}	1	0	0
I_{R_b}	1	0	0

同理，通过用虚拟源替换复杂网络中的所有节点，并将电力传输网络分解为Y形网络，可以分别处理每个Y形网络并定位故障。根据网络的不同情况，HI的取值可能出现相等且等于零、相等且不为0、不相等三种情况，但是在采用表1中所定义的特征参数时，HI值只会0和1两种取值。根据不同的HI取值，提出了三个残差参数 r_a 、 r_b 、 $r_{b,a}$ 来检测故障并定位故障支路，当故障

位于接收器的公共节点之前，也就是发生故障 B_s 的情况下，通过计算所得到的HI值是相等的，因此 $r_{b,a}$ 为0。若故障位于公共节点之后，将会出现两种情况。当故障位于直接连接到接收器 R_a 的分支时，该接收器的HI高于接收器 R_b 的HI，因此计算出的残差将保持负值。当故障位于直接连接到接收器 R_b 的分支处时，该接收器的HI高于接收器 R_a 的HI，因此计算出的残差将保持正值。

四、结论

本文提出了一种处理复杂网络的方法，通过将复杂网络拆分为Y形子网络，有效地简化了复杂网络的故障处理流程。监控这些子网能够实现对故障的检测和隔离，提高系统的鲁棒性和可靠性。此方法能够适应不同类型的复杂网络，为应对配电系统中的复杂网络结构提供了一种有效的解决方案。本文的验证了所提出方法的有效性和可行性。表明，方法能够快速准确地检测和隔离配电系统中的故障，具备较高的扰动抗干扰能力和故障处理能力。通过云端协同，本文方法能够提高配电系统的安全稳定运行能力，保障电力供应的可靠性。

参考文献

[1] 钟伟,周宇杰,王泽辉等. 新型电力系统安全稳定运行分析[J]. 湖南电力, 2022, 42 (03): 29-34.

[2] 郭明. 配电系统的快速故障检测与识别方法[J]. 电气自动化, 2021, 43 (03): 96-98.

[3] 杜伊. 电力系统继电保护及故障检测方法分析[J]. 科学技术创新, 2020 (35): 171-172.

[4] 郑健生. 人工智能技术在电力系统故障诊断中的运用分析[J]. 科技与创新, 2019 (02): 136+139.

[5] 范月圆. 无人机智能巡检在风电光伏故障检测中的应用[J]. 电子元器件与信息技术, 2021, 5 (02): 75-76.