

行政院原子能委員會核能研究所

委託研究計畫研究報告

配電級分散式電源運轉模式之短路電流研究

Studies on Fault Current from Distributed Generations
Considering Operation Modes in Distribution Level

計畫編號：111A010

受委託機關(構)：中原大學

計畫主持人：洪穎怡教授

聯絡電話：03-2652500

E-mail address：yyhong@ee.cycu.edu.tw

研究期程：中華民國 111 年 2 月至 111 年 12 月

研究經費：新臺幣 97 萬元

核研所聯絡人員：葉進男

中華民國 111 年 11 月 30 日

目錄

摘要.....	3
壹、簡介.....	6
一、 研究背景	6
二、 研究目標	7
三、 文獻探討	7
貳、等效電路之短路電流關係式.....	9
一、 具光伏系統的配電系統	9
二、 具 BESS 的配電系統	16
三、 平衡與不平衡故障分析	24
參、不同控制模式之分散式電源之短路電流分析.....	32
一、 MPPT 控制	32
二、 PQ 控制	37
三、 VQ 及 Pf 控制	42
肆、使用 MATLAB Simulink 模擬與解析解的比較.....	50
一、 情境 1	52
二、 情境 2	59
三、 情境 3	67
四、 情境 4	75
五、 情境 5	82
六、 情境 6	89
伍、即時模擬.....	97
陸、功率硬體迴圈模擬實驗(Power Hardware in the Loop Simulation)	
104	
柒、結論.....	110
捌、參考文獻.....	111

摘要

本計畫針對短路故障條件下，配電系統中基於變流器的分散式電源(Inverter-based Distributed Generation, IBDG)的各種控制模式進行研究。分散式電源測試系統分別採用光伏(Photovoltaics, PV)系統與電池儲能系統(Battery Energy Storage System, BESS)。本計畫建構正序、負序與零序等效電路以尋求穩態條件下的三相平衡、單相接地、相間與雙相接地及單相高阻抗接地故障。

本報告為期末報告，首先利用戴維寧或諾頓等效電路，考慮具逆變器之分散式電源以電壓源或電流源為模型，推導於平衡故障及各種不平衡故障的短路電流關係式。

其次提出具 IBDG 的配電系統之平衡與不平衡故障的分析公式(靜態模型)。考慮的控制模式方面，在基於逆變器的 PV 系統採用的控制方案為最大功率追蹤(Maximum Power Point Tracking, MPPT) 模式、P-Q 控制與 V-Q 下垂模式。在基於逆變器的 BESS 系統採用的控制方案為 P-Q 模式、V-Q 與 P-f 下垂模式。除了推導穩態故障電流之外，本計畫也推導出初始暫態高峰故障電流之數學關係式。

本計畫用三種模擬方式來驗證上述解析公式的正確性，包括 MATLAB Simulink 模擬與解析解的比較、Opal-RT eMegasim 的分核即時模擬及功率硬體迴圈模擬實驗。

關鍵詞：短路故障、光伏系統、儲能系統、控制模式、功率硬體迴圈模擬實驗。

Abstract

In this project, various modes of Inverter-based Distributed Generation (IBDG) in distribution systems are studied under fault conditions. This project adopts the photovoltaic (Photovoltaics, PV) system and battery energy storage system (Battery Energy Storage, BESS). This project implements positive sequence, negative sequence and zero sequence equivalent circuits to study three-phase balanced, single-phase-to-ground, phase-to-phase and two-phase-to-ground, and single-phase high-impedance grounding faults under steady-state conditions.

This report is a final report. First, through the Thevenin or Norton equivalent circuit, by considering the distributed generation with inverters as a voltage source or current source model, the short-circuit current relationship associated with balanced faults and various unbalanced faults is derived.

Secondly, the analytical formula (static model) of balanced and unbalanced faults of distribution system with IBDG are proposed. In terms of control modes considered, the control schemes used in

inverter-based PV systems are Maximum Power Point Tracking (MPPT), P-Q and V-Q droop mode. The control schemes adopted in the inverter-based BESS system are P-Q mode, V-Q and P-f droop modes. In addition to deriving the steady-state fault current, this project also deduces a mathematical expression for the initial transient peak fault current.

This project uses three kinds of simulations to validate the accuracy of the proposed analytical formula: Matlab Simulink time-domain simulation, Opal-RT eMegasim real-time digital simulation and power hardware-in-the-loop simulation.

Keywords: Short circuit fault, Photovoltaic system, Energy storage, Control mode, Power hardware-in-the-loop simulation.

壹、簡介

一、研究背景

由於敏感負載對潔淨能源、高可靠性與電力品質的需求，因此對分散式能源的需求逐漸上升[1]。此外，分散式能源可以減少或延遲因電力需求的增加而導致電網系統升級的投資。除了傳統的同步發電機外，還有許多分散式電源技術，例如儲能系統(BESS)、燃料電池、風力發電機、太陽能板與微型渦輪機。這些分散式電源通常需藉由電力電子與公用電網互聯。

在用戶端安裝分散式電源時，可經由減輕故障期間的電壓驟降[2] [3]來提高用戶的電力品質。此外，備用發電機一般可在 2 分鐘內啟動，可改善電力品質的可靠度。雖然安裝分散式電源雖然有許多優點，但也需要注意操作時的衝突，例如保護裝置協調的變化、誤跳電、安全降級以及保護繼電器的改變 [4]。

本研究配電系統發生故障時，基於逆變器的分散式發電(Inverter-Based Distributed Generation, IBDG) 於不同模式下的故障電流分析。具體而言，擬解決以下問題：

- a. IBDG 在平衡與不平衡配電網路的短路分析。
- b. 在各種平衡與不平衡的故障控制方案下，提供基於逆變器的 PV 與 BESS 靜態等效模型的解析公式。
- c. 分析 IBDG 辨識配電系統的三相、單相接地、相對相與雙相接地及單相高阻抗接地故障。
- d. 使用 MATLAB Simulink 驗證 IBDG 靜態模型的穩態結果與動態模型的時域分析，並在 OPAL-RT 即時模擬中實現。

最後，本研究將提供具 IBDG 的配電系統所發生的故障電流，將有助於調整配電系統保護裝置的協調與選型。

二、研究目標

本研究的目的為分析具 IBDG 的配電系統於故障狀態時的模式，研究目標如下：

- 以配電系統的戴維寧(Thevenin)或諾頓(Norton)等效電路研究 IBDG (PV 系統與 BESS 系統)的平衡與不平衡(單相接地、相對相、雙線接地、單相高阻抗)故障。
- 提出具 IBDG 的配電系統之平衡與不平衡故障的分析公式(靜態模型)。基於逆變器的 PV 系統採用的控制方案為 MPPT 模式與 V-Q 下垂模式。基於逆變器的 BESS 系統採用的控制方案為 P-Q 模式、V-Q 與 P-f 下垂模式。
- 使用計算機模擬基於 IBDG 配電系統的平衡與不平衡故障的數值研究。
- 使用 MATLAB Simulink 與 OPAL-RT(power hardware-in-the loop) 模擬比較穩態靜態模型與動態模型的結果。

三、文獻探討

不同研究顯示 IBDG 對配電系統故障分析的影響。文獻[5]研究同步電機與基於逆變器的分散式發電機對故障電流的貢獻，採用疊加原理確定 IBDG 引起的短路，分別獲得短路電流的交流分量與直流分量。文獻[6]與[7]透過減少使用公用事業出力，並考慮故障狀況，求得最大允許分散式發電容量。在 [6] 中，對 IBDG 進行最大電流相位角調整策略，以最大化其負貢獻，從而最小化系統故障電流。為獲得更精確的電流相角，並透過以 IBDG 與故障母線間的電氣距離的電壓角差，制定電壓相角確定(Voltage Phase

Angle Determination, VPAD)策略。文獻[7] 提出一種開發 IBDG 靜態等效模型的方法，該模型運用於電網的穩態故障分析。文獻 [8] 提出一項新的故障電流管理技術，用於具逆變器的分散式發電機的放射狀系統。文獻[9] IBDG 使用負貢獻法，探討不平衡故障。文獻[10]、[11] 與 [12] 討論 IBDG 在配電系統上，使用時序網路與電路建模的故障響應分析；在 IBDG 的等效負序與零序電路的建模中，可以看到不平衡電壓或電流的影響，故障電流可以使用阻抗矩陣或電路分析來解決平衡與不平衡條件。在文獻[13]提到在 IBDG 組成的微電網中，無法以故障電流大小來判斷故障現象，而使用傅里葉演算法(Fourier algorithm)會導致漏頻，因此文獻[13]提出一種基於改進小波算法的數位濾波自適應距離保護算法。文獻[14]使用改進的 IBDG 相角計算來消除智慧電網中同步 DG 的故障電流貢獻。文獻 [15] 與 [16] 研究逆變器的每種控制模式如何影響 IBDG 的靜態模型。P-Q、P-f 與 V-Q 等控制模式顯示在以下研究中，以及它們如何改變 IBDG 的等效電路模型。

貳、等效電路之短路電流關係式

本章節說明使用戴維寧(Thevenin)或諾頓(Norton)等效電路研究具IBDG (PV 系統與 BESS 系統)的平衡與不平衡(單相接地、相對相、雙線接地及單相高阻抗接地)故障。

一、具光伏系統的配電系統

圖 1 為具光伏系統的配電系統，此系統由 3 條母線組成。母線 1 為公用事業，母線 3 為 PV 系統的 IBDG，母線 2 為負載。饋線連接在母線 1 到 3 與母線 3 到 2 之間。

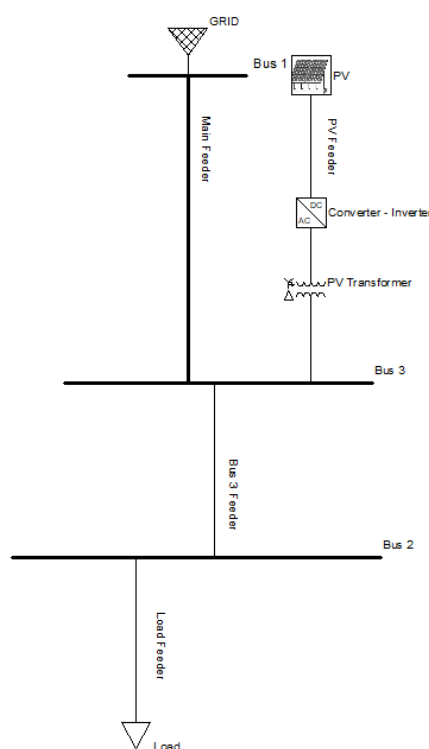


圖 1 具 PV 發電系統的配電網

如圖 1 所示的具 PV 發電系統的配電網，可將其建模為等效序列網路如圖 2 至圖 4。圖 2 為正序網路，圖 3 為負序網路，圖 4 為零序網路。圖中 R_s 是連接到光伏系統的串聯電阻。參考過去文獻的研究，分散式電源的任

何串聯元件都不會在負序和零序網路中考慮，因此在圖 3 和圖 4 中忽略了 R_s 。

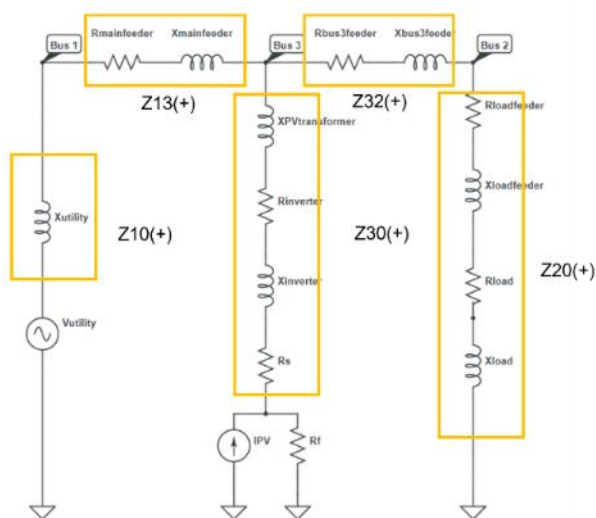


圖 2 具 PV 配電網的正序網路

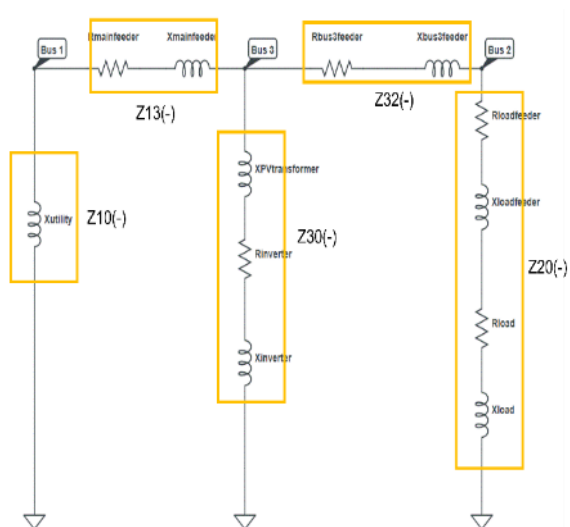


圖 3 具 PV 配電網的負序網路

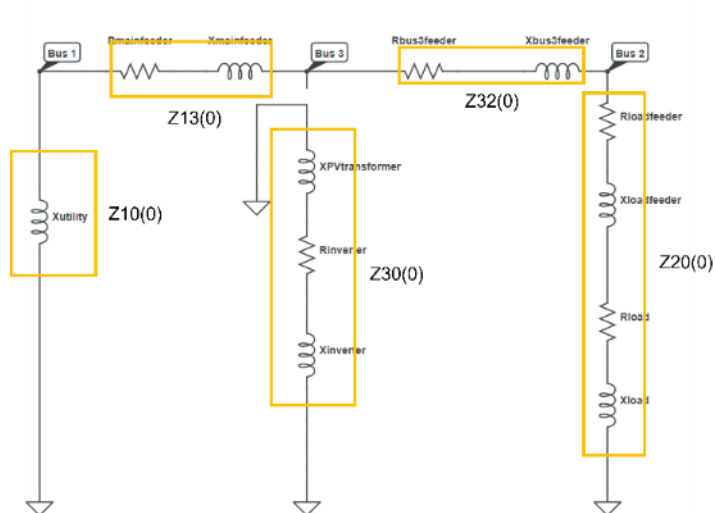


圖 4 具 PV 配電網的零序網路

本計畫考慮母線 1 與母線 2 分別發生故障，將為每個序列網路開發等效電路。戴維寧與諾頓定理的原理將應用於每個序列網路。

1. 母線 1 的戴維寧與諾頓等效電路

為獲得 2 個獨立電源的正序網路等效電路，本計畫將使用疊加原理。圖 5 為考慮連接電網電壓源時，PV 系統建模的電流源將成開路。圖 6 為考慮 PV 系統電流源發電時，連接大電網電壓源短路。

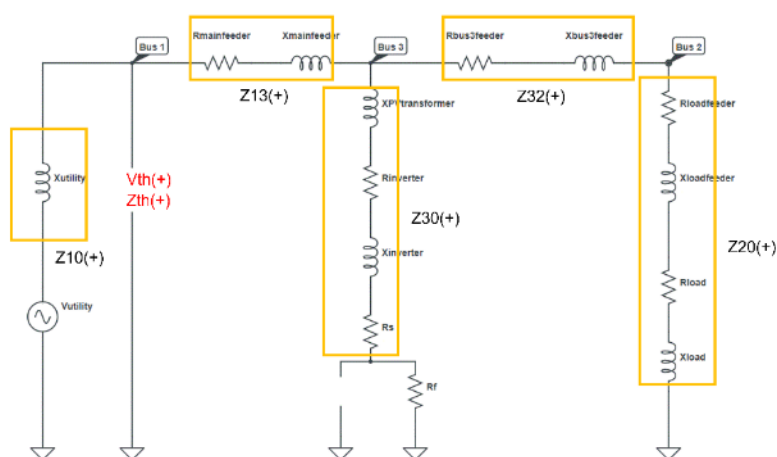


圖 5 具 PV 配電網的母線 1 上的戴維寧等效電路

7 所示，具 PV 配電網的負序等效阻抗可推導如下：

$$Z_{th(-)}^1 = Z_{N(-)}^1 = \frac{Z_{10(-)} \left(Z_{13(-)} + \frac{(Z_{30(-)})(Z_{32(-)} + Z_{20(-)})}{Z_{30(-)} + Z_{32(-)} + Z_{20(-)}} \right)}{Z_{10(-)} + Z_{13(-)} + \frac{(Z_{30(-)})(Z_{32(-)} + Z_{20(-)})}{Z_{30(-)} + Z_{32(-)} + Z_{20(-)}}} \quad (5)$$

如圖 8 所示，具 PV 配電網的零序等效阻抗可推導如下：

$$Z_{th(0)}^1 = Z_{N(0)}^1 = \frac{Z_{10(0)}(Z_{13(0)} + Z_{32(0)} + Z_{20(0)})}{Z_{10(0)} + Z_{13(0)} + Z_{32(0)} + Z_{20(0)}} \quad (6)$$

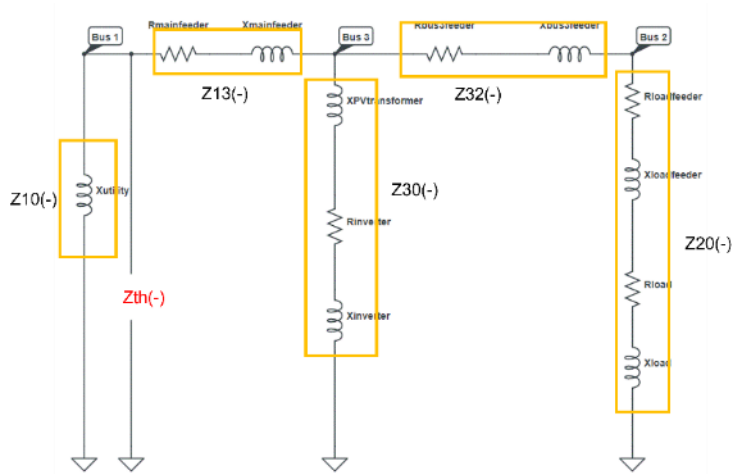


圖 7 具 PV 配電網的母線 1 上的負序等效電路

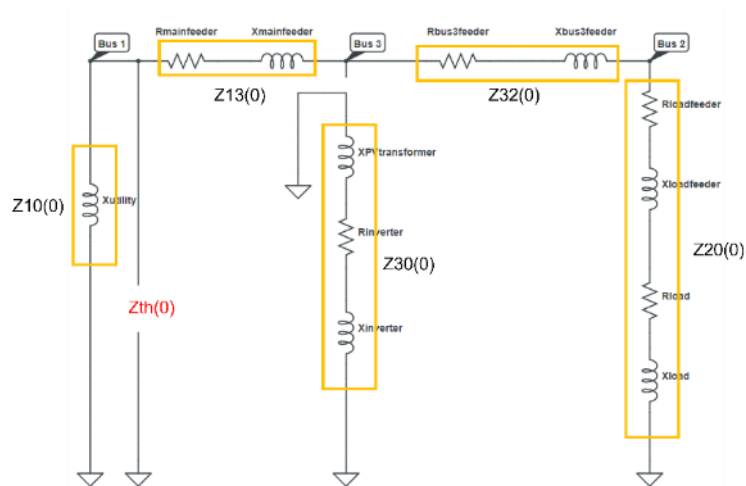


圖 8 具 PV 配電網的母線 1 上的零序等效電路

2. 母線 2 上的戴維寧與諾頓等效電路

為獲得具 2 個獨立電源的正序網路的等效電路，本計畫將應用疊加原

理。圖 9 為考慮連接電網電壓源時，PV 系統建模的電流源將成開路。圖 10 為考慮 PV 系統電流源發電時，連接大電網電壓源短路。

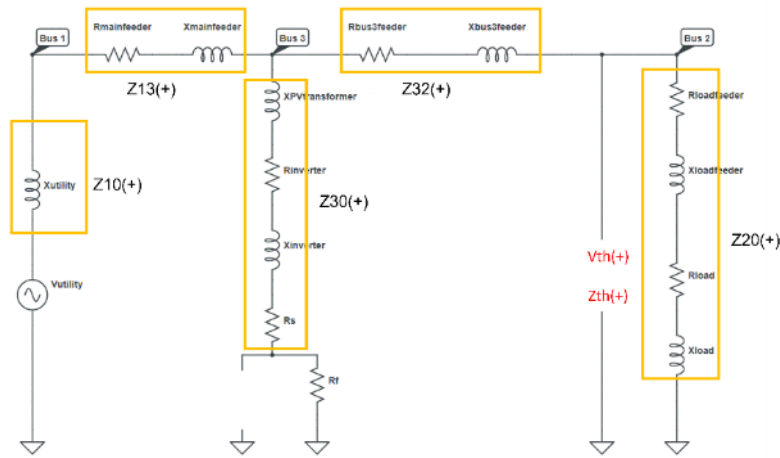


圖 9 具 PV 配電網的母線 2 上之戴維寧等效電路

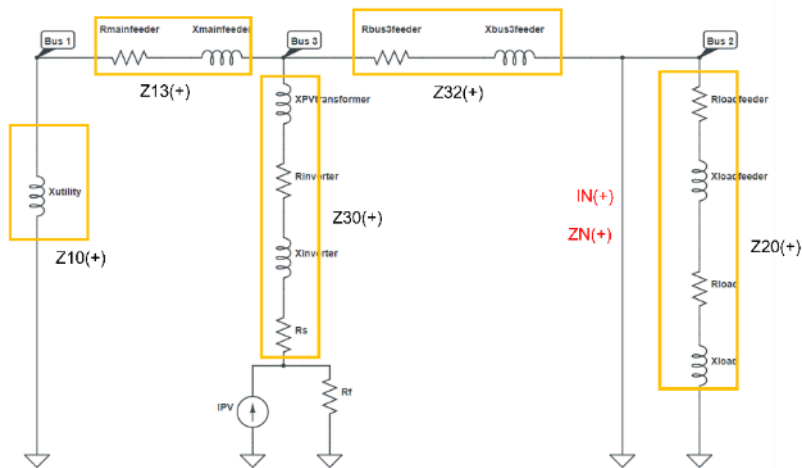


圖 10 具 PV 配電網的母線 上之諾頓等效電路

根據圖 9，為獲得具 PV 配電網的母線 2 之戴維寧等效電壓，本計畫使用分壓規則。

$$V_{th(+)}^2 = V_{utility} \left(\frac{\frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}}}{Z_{10(+)} + Z_{13(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}}} \right) \left(\frac{Z_{20(+)}}{Z_{32(+)} + Z_{20(+)}} \right)$$

(7)

具 PV 配電網的母線 2 之戴維寧等效阻抗可推導出如下：

$$Z_{th(+)}^2 = \frac{Z_{20(+)} \left(Z_{32(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{13(+)} + Z_{10(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{13(+)} + Z_{10(+)}} \right)}{Z_{20(+)} + Z_{32(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{13(+)} + Z_{10(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{13(+)} + Z_{10(+)}}} \quad (8)$$

根據圖 10，為獲得具 PV 配電網的母線 2 之諾頓等效電流，使用分流規則。

$$I_{N(+)}^2 = I_{PV} \left(\frac{R_f(Z_{13(+)} + Z_{10(+)})}{R_f(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{10(+)} + Z_{30}(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{10(+)} + Z_{32}(Z_{13} + Z_{10}))} \right) \quad (9)$$

母線 2 的諾頓等效阻抗推導如下：

$$Z_{th(+)}^2 = Z_{N(+)}^2 = \frac{Z_{20(+)} \left(Z_{32(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{13(+)} + Z_{10(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{13(+)} + Z_{10(+)}} \right)}{Z_{20(+)} + Z_{32(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{13(+)} + Z_{10(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{13(+)} + Z_{10(+)}}} \quad (10)$$

此外，具 PV 配電網的負序與零序等效電路如圖 11 與圖 12 所示。

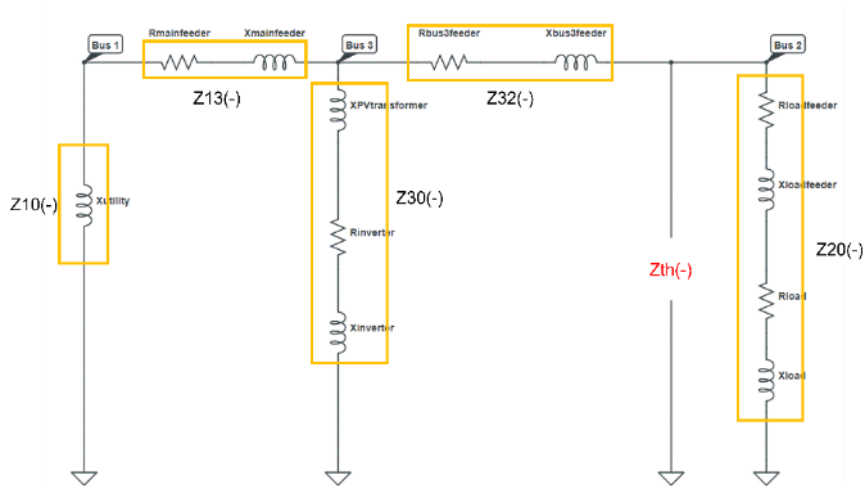


圖 11 具 PV 配電網的母線 2 上之負序相等電路

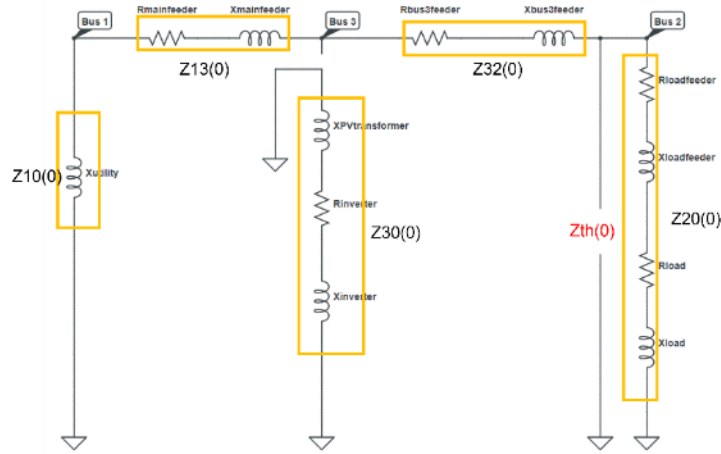


圖 12 具 PV 配電網的母線 2 之零序等效電路

如圖 11 所示，可推導出具 PV 配電網的母線 2 負序等效阻抗如(11)式：

$$Z_{th(-)}^2 = Z_{N(-)}^2 = \frac{Z_{20(-)} \left(Z_{32(-)} + \frac{(Z_{30(-)})(Z_{13(-)} + Z_{10(-)})}{Z_{30(-)} + Z_{13(-)} + Z_{10(-)}} \right)}{Z_{20(-)} + Z_{32(-)} + \frac{(Z_{30(-)})(Z_{13(-)} + Z_{10(-)})}{Z_{30(-)} + Z_{13(-)} + Z_{10(-)}}} \quad (11)$$

如圖 12 所示，具 PV 的配電系統於母線 2 零序等效阻抗推導如下：

$$Z_{th(0)}^2 = Z_{N(0)}^2 = \frac{Z_{20(-)}(Z_{13(-)} + Z_{32(0)} + Z_{10(0)})}{Z_{20(-)} + Z_{13(-)} + Z_{32(0)} + Z_{10(0)}} \quad (12)$$

二、具 BESS 的配電系統

圖 13 為一個以 BESS 作為其 IBDG 的配電系統，此配電系統由 3 個母線組成。母線 1 是公用事業，母線 3 有 IBDG，在這種情況下是 BESS 系統，母線 2 有負載。饋線連接母線 1 到 3 與母線 3 到 2。

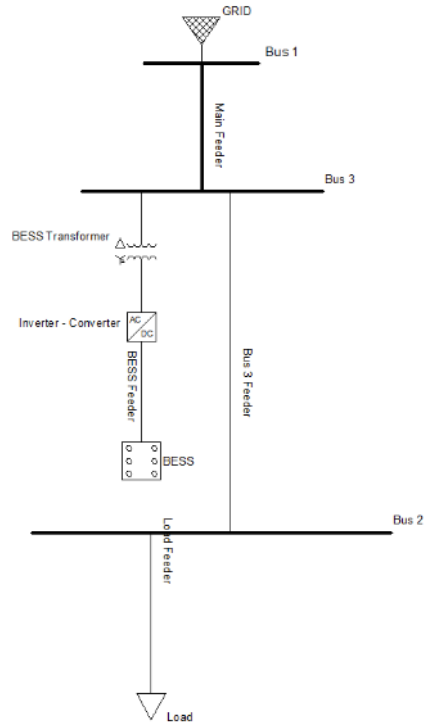


圖 13 具 BESS 的配電系統

配電系統如圖 13 所示可將其建模為等效的序列網路，如圖 14 到圖 16。圖 14 為正序網路，圖 15 為負序網路，圖 16 為零序網路。考慮母線 1 與母線 2 分別發生的故障，將為每個序列網路開發成等效電路，以適用戴維寧與諾頓定理的原理於每個序列網路。圖中 R_s 是連接到光伏系統的串聯電阻。參考過去文獻的研究，分散式電源的任何串聯元件都不會在負序和零序網路中考慮，因此在圖 15 和圖 16 中忽略了 R_s 。

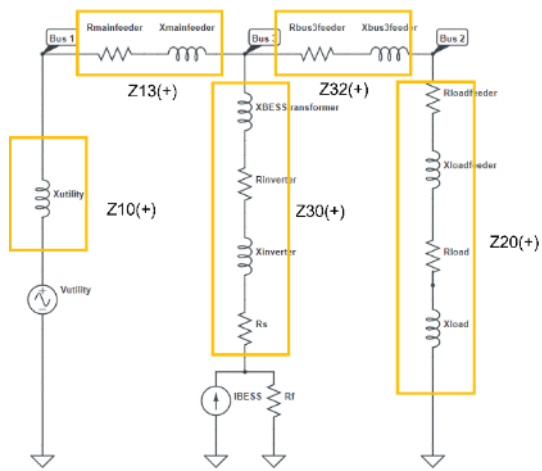


圖 14 具 BESS 的配電系統正序網路

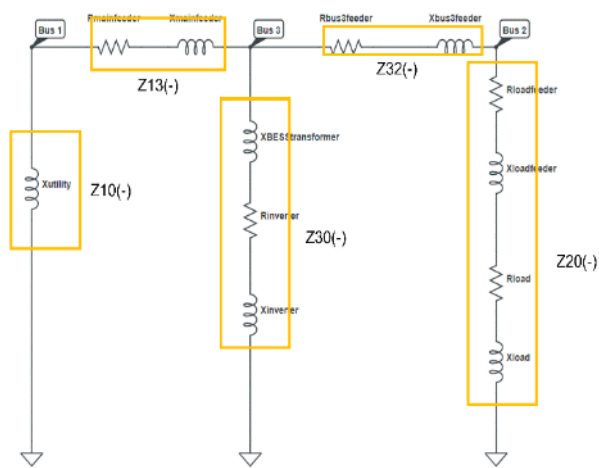


圖 15 具 BESS 的配電系統負序列網路

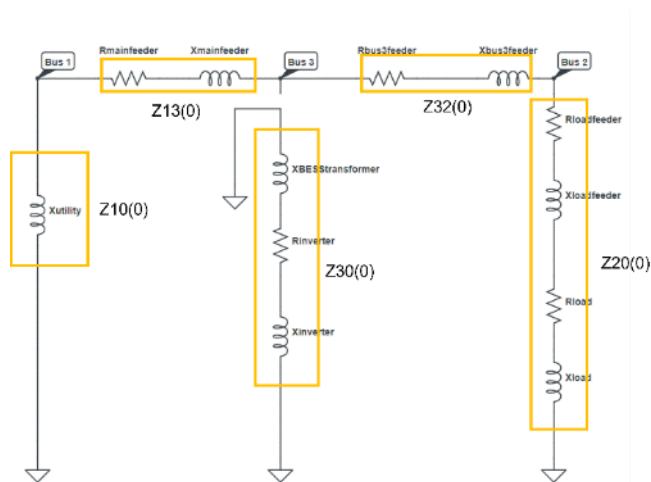


圖 16 具 BESS 的配電系統零序網路

3. 具 BESS 的配電系統於母線 1 的戴維寧與諾頓等效電路

為獲得 2 個獨立源的正序網路的等效電路，將疊加原理應用於正序網路。圖 17 為連接大電網的電壓源時，BESS 系統建模的電流源打開。圖 18 為連接大電網的電壓源短路時，BESS 電流源併網。

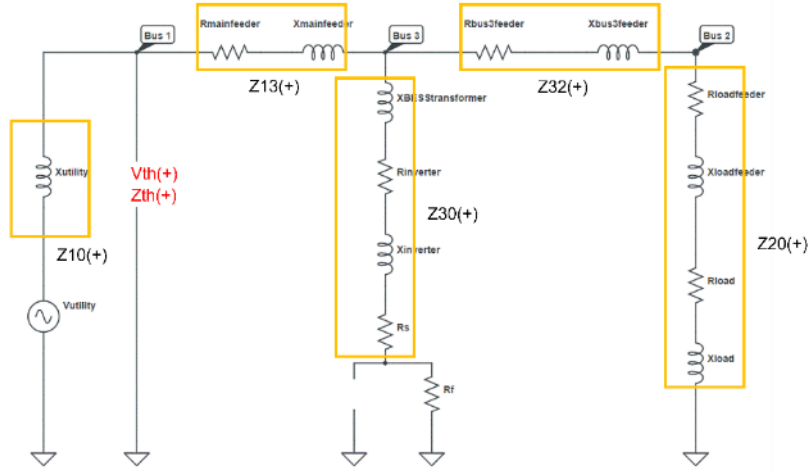


圖 17 具 BESS 的配電系統於母線 1 的戴維寧等效電路

根據圖 17，為獲得具 BESS 的配電系統於母線 1 的戴維寧等效電壓，使用分壓規則如下：

$$V_{th(+)}^1 = V_{utility} \left(\frac{Z_{13(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}}}{Z_{10(+)} + Z_{13(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}}} \right) \quad (13)$$

同理，具 BESS 的配電系統於母線 1 的戴維寧等效阻抗可推導如下：

$$Z_{th(+)}^1 = \frac{Z_{10(+)} \left(Z_{13(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}} \right)}{Z_{10(+)} + Z_{13(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}}} \quad (14)$$

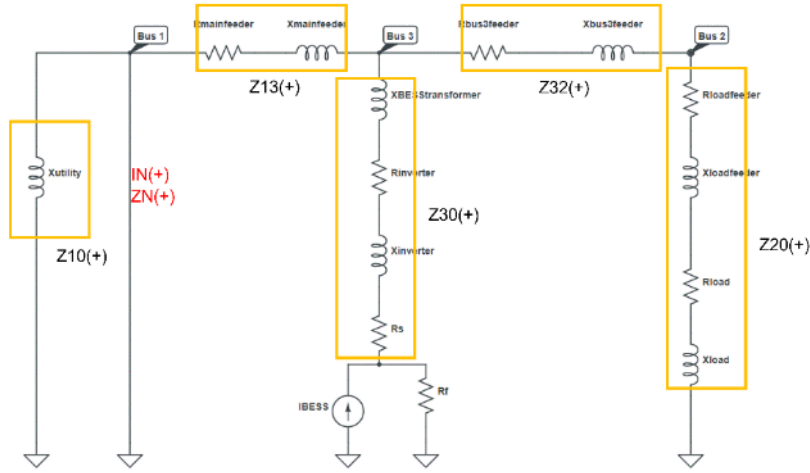


圖 18 具 BESS 的配電系統於母線 1 的諾頓等效電路

根據圖 18，為獲得具 BESS 的配電系統於母線 1 的諾頓等效電流，使用分流規則如下。

$$I_{N(+)}^1 = I_{BESS} \left(\frac{R_f(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})}{R_f(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}) + Z_{30}(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}) + Z_{13}(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})} \right) \quad (15)$$

同理，具 BESS 的配電系統於母線 1 的諾頓等效阻抗可推導如下：

$$Z_{th(+)}^1 = Z_{N(+)}^1 = \frac{Z_{10(+)} \left(Z_{13(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}} \right)}{Z_{10(+)} + Z_{13(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}}} \quad (16)$$

負序與零序等效電路如圖 19 與圖 20 所示。

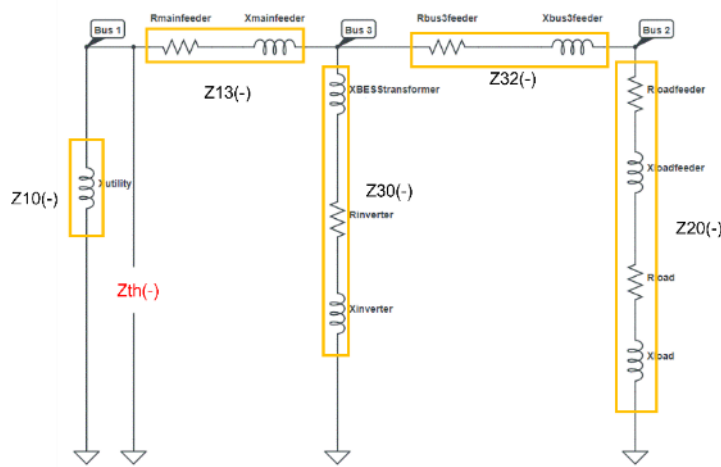


圖 19 具 BESS 的配電系統於母線 1 的負序等效電路

如圖 19 所示，具 BESS 的配電系統於母線 1 的負序等效電路可推導如下：

$$Z_{th(-)}^1 = Z_{N(-)}^1 = \frac{Z_{10(-)} \left(Z_{13(-)} + \frac{(Z_{30(-)})(Z_{32(-)} + Z_{20(-)})}{Z_{30(-)} + Z_{32(-)} + Z_{20(-)}} \right)}{Z_{10(-)} + Z_{13(-)} + \frac{(Z_{30(-)})(Z_{32(-)} + Z_{20(-)})}{Z_{30(-)} + Z_{32(-)} + Z_{20(-)}}} \quad (17)$$

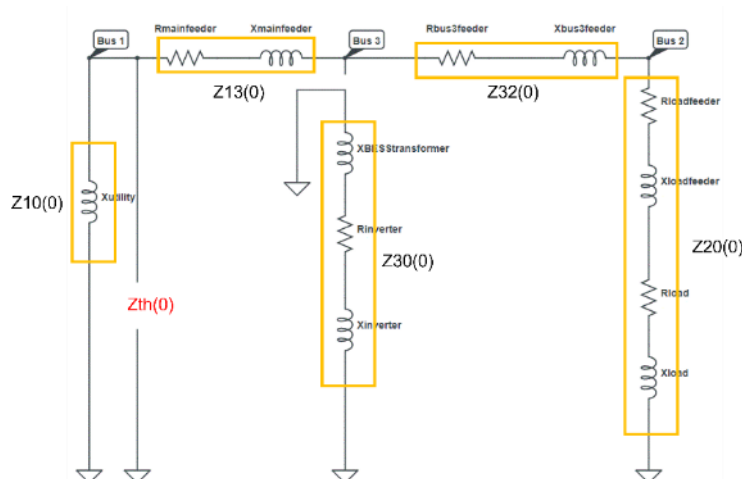


圖 20 具 BESS 的配電系統於母線 1 的零序等效電路

如圖 20 所示，具 BESS 的配電系統於母線 1 的零序等效電路可推導如下：

$$Z_{th(0)}^1 = Z_{N(0)}^1 = \frac{Z_{10(-)} (Z_{13(-)} + Z_{32(0)} + Z_{20(0)})}{Z_{10(-)} + Z_{13(-)} + Z_{32(0)} + Z_{20(0)}} \quad (18)$$

4. 具 BESS 的配電系統於母線 2 的戴維寧與諾頓等效電路

為獲得 2 個獨立電源的正序網路之等效電路，將疊加原理應用於正序網路分析。圖 21 為連接大電網的電壓源時，BESS 系統建模的電流源打開。圖 22 為連接大電網的電壓源短路時，BESS 電流源併網。

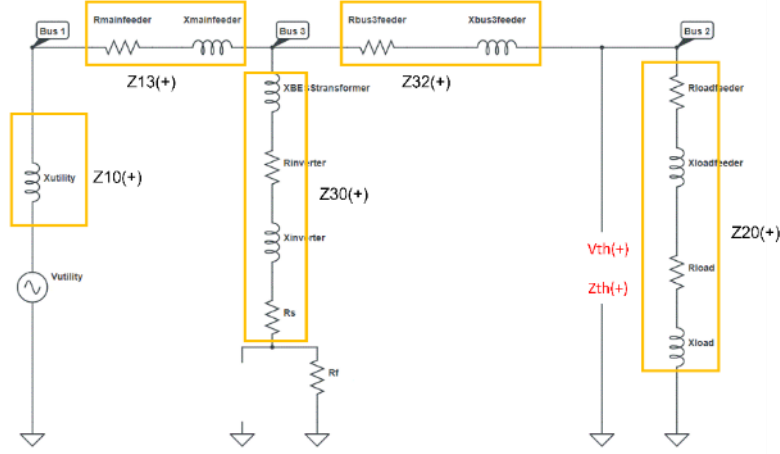


圖 21 具 BESS 的配電系統於母線 2 的戴維寧等效電路

根據圖 21，為獲得具 BESS 的配電系統於母線 2 的戴維寧等效電壓，使用分壓規則如下。

$$V_{th(+)}^2 = V_{utility} \left(\frac{\frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}}}{Z_{10(+)} + Z_{13(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}}} \right) \left(\frac{Z_{20(+)}}{Z_{32(+)} + Z_{20(+)}} \right) \quad (19)$$

同理，具 BESS 的配電系統於母線 2 的戴維寧等效阻抗可推導如下：

$$Z_{th(+)}^2 = \frac{Z_{20(+)} \left(Z_{32(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{13(+)} + Z_{10(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{13(+)} + Z_{10(+)}} \right)}{Z_{20(+)} + Z_{32(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{13(+)} + Z_{10(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{13(+)} + Z_{10(+)}}} \quad (20)$$

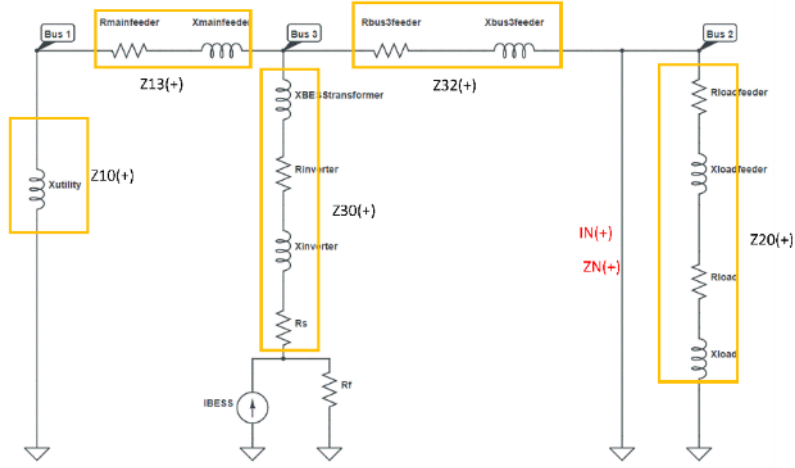


圖 22 具 BESS 的配電系統於母線 2 的諾頓等效電路

根據圖 22，為獲得具 BESS 的配電系統於母線 2 的諾頓等效電流，使用分流規則。

$$I_{N(+)}^2 = I_{BESS} \left(\frac{R_f(Z_{13(+)} + Z_{10(+)})}{R_f(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{10(+)} + Z_{30}(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{10(+)} + Z_{32}(Z_{13} + Z_{10}))} \right) \quad (21)$$

同理，具 BESS 的配電系統於母線 2 的諾頓等效阻抗可推導如下：

$$Z_{th(+)}^2 = Z_{N(+)}^2 = \frac{Z_{20(+)} \left(Z_{32(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{13(+)} + Z_{10(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{13(+)} + Z_{10(+)}} \right)}{Z_{20(+)} + Z_{32(+)} + \frac{(Z_{30(+)} + R_f)(Z_{13(+)} + Z_{10(+)})}{Z_{30(+)} + R_f + Z_{13(+)} + Z_{10(+)}}} \quad (22)$$

具 BESS 的配電系統之負序與零序等效電路如圖 23 與 圖 24 所示。

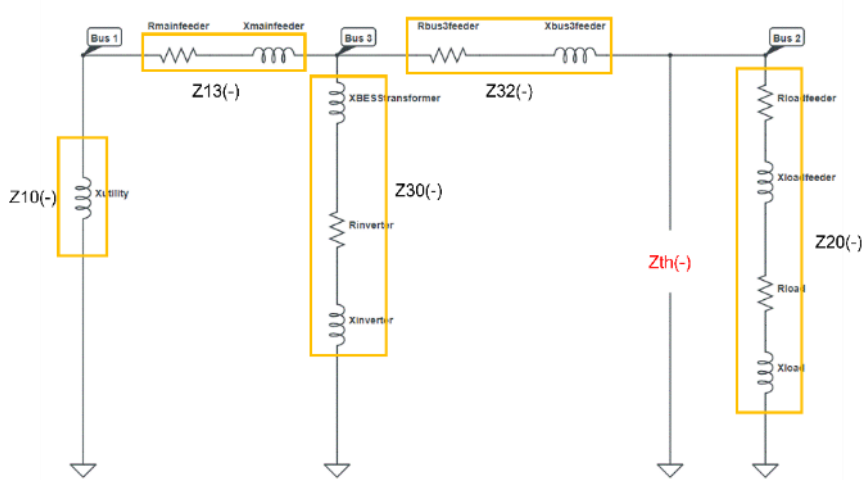


圖 23 具 BESS 的配電系統於母線 2 的負序等效電路

如圖 23 所示，具 BESS 的配電系統於母線 2 的負序等效阻抗可推導如下：

$$Z_{th(-)}^2 = Z_{N(-)}^2 = \frac{Z_{20(-)} \left(Z_{32(-)} + \frac{(Z_{30(-)})(Z_{13(-)} + Z_{10(-)})}{Z_{30(-)} + Z_{13(-)} + Z_{10(-)}} \right)}{Z_{20(-)} + Z_{32(-)} + \frac{(Z_{30(-)})(Z_{13(-)} + Z_{10(-)})}{Z_{30(-)} + Z_{13(-)} + Z_{10(-)}}} \quad (23)$$

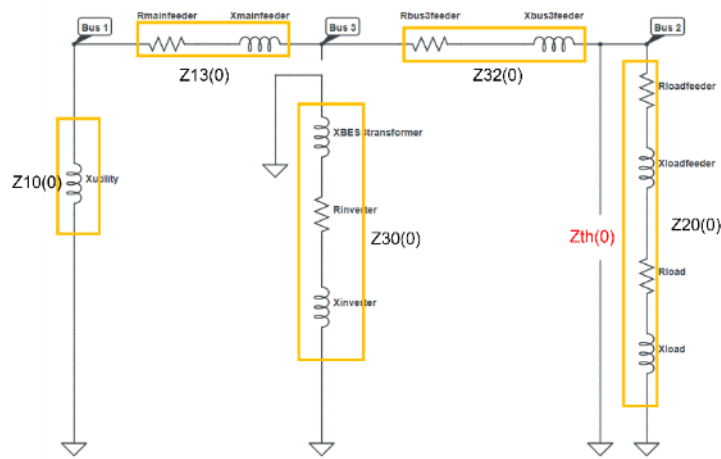


圖 24 具 BESS 的配電系統於母線 2 的零序等效電路

如圖 24 所示，具 BESS 的配電系統於母線 2 的零序等效阻抗可推導如下：

$$Z_{th(0)}^2 = Z_{N(0)}^2 = \frac{Z_{20(-)}(Z_{13(-)} + Z_{32(0)} + Z_{10(0)})}{Z_{20(-)} + Z_{13(-)} + Z_{32(0)} + Z_{10(0)}} \quad (24)$$

三、平衡與不平衡故障分析

本小節將討論具 IBDG(PV 或 BESS 系統)的配電系統，其平衡與不平衡故障分析。

1. 母線 1 與母線 2 的三相故障計算

母線 1 的三相故障電流計算可使用圖 5 與圖 6 的具光伏系統的配電系統，或圖 17 與圖 18 的具 BESS 系統的配電系統。由於配電系統由兩個獨立電源組成，可以應用疊加原理：

$$I_{3\Phi}^1 = I' + I'' \quad (25)$$

其中 $I' = \frac{V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1}$ 且 $I'' = I_{N(+)}^1$.

其結果公式如下：

$$I_{3\Phi}^1 = \frac{V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1} + I_{N(+)}^1 \quad (26)$$

$V_{th(+)}^1$, $Z_{th(+)}^1$ 與 $I_{N(+)}^1$ 可以用式(2)~(4)代入，如果配電系統具光伏系統，可簡化如下：

$$I_{3\Phi}^1 = \frac{V_{utility}}{Z_{10(+)}} + I_{PV} \left(\frac{R_f(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})}{R_f(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}) + Z_{30}(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}) + Z_{13}(Z_{32} + Z_{20})} \right) \quad (27)$$

另一方面，如果配電系統具 BESS，則 $V_{th(+)}^1$, $Z_{th(+)}^1$ 與 $I_{N(+)}^1$ 可以用式(13)~(16)簡化如下：

$$I_{3\Phi}^1 = \frac{V_{utility}}{Z_{10(+)}} + I_{BESS} \left(\frac{R_f(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})}{R_f(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}) + Z_{30}(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}) + Z_{13}(Z_{32} + Z_{20})} \right) \quad (28)$$

母線 2 的三相故障電流可使用圖 9 與圖 10 的具光伏系統配電系統或圖 21 與圖 22 的具 BESS 的配電系統計算。由於配電系統由兩個獨立電源組成，可使用疊加原理如下：

$$I_{3\Phi}^2 = I' + I'' \quad (29)$$

其中 $I' = \frac{V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2}$ 且 $I'' = I_{N(+)}^2$.

結果公式如下：

$$I_{3\Phi}^2 = \frac{V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2} + I_{N(+)}^2 \quad (30)$$

$V_{th(+)}^2$, $Z_{th(+)}^2$ 與 $I_{N(+)}^2$ 可使用式(7)~(10)代入，如果配電系統具光伏系統，則可簡化如下：

$$I_{3\Phi}^2 = \frac{V_{utility}(Z_{30(+)}+R_f)}{(Z_{10(+)}+Z_{13(+)})(Z_{30(+)}+R_f+Z_{32(+)}+(Z_{30(+)}+R_f)(Z_{32(+)}))} + I_{PV} \left(\frac{R_f(Z_{13(+)}+Z_{10(+)})}{R_f(Z_{13(+)}+Z_{32(+)}+Z_{10(+)}+Z_{30}(Z_{13(+)}+Z_{32(+)}+Z_{10(+)}+Z_{32}(Z_{13}+Z_{10}))} \right) \quad (31)$$

另外，如果配電系統具 BESS，則 $V_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(+)}^2$ 與 $I_{N(+)}^2$ 可使用式(19)~(22) 代入如下：

$$I_{3\Phi}^2 = \frac{V_{utility}(Z_{30(+)}+R_f)}{(Z_{10(+)}+Z_{13(+)})(Z_{30(+)}+R_f+Z_{32(+)}+(Z_{30(+)}+R_f)(Z_{32(+)}))} + I_{BESS} \left(\frac{R_f(Z_{13(+)}+Z_{10(+)})}{R_f(Z_{13(+)}+Z_{32(+)}+Z_{10(+)}+Z_{30}(Z_{13(+)}+Z_{32(+)}+Z_{10(+)}+Z_{32}(Z_{13}+Z_{10}))} \right) \quad (32)$$

2. 母線 1 與母線 2 的單相接地故障計算

單相對地故障的互聯時序網路，如圖 25 所示。

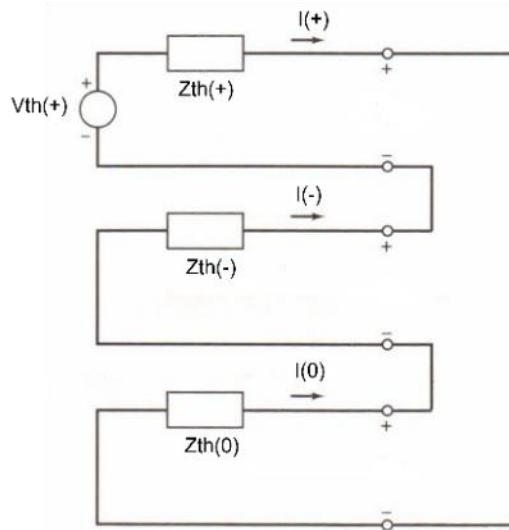


圖 25 單相接地故障的互聯時序網路

由於配電系統由兩個獨立電源組成，因此可利用疊加原理。母線 1 的單相對地故障電流可推導如下：

$$I_{LG}^1 = 3I' + 3I'' \quad (33)$$

$$\text{其中 } I' = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1} \quad \text{且} \quad I'' = \frac{3I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1}; \quad I' = I'_{(+)} =$$

$$I'_{(-)} = I'_{(0)} \quad \text{且} \quad I'' = I''_{(+)} = I''_{(-)} = I''_{(0)}。$$

其結果公式如下：

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1} + \frac{3I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1} \quad (34)$$

同理，母線 2 的單相對地故障電流可推導如下：

$$I_{LG}^2 = 3I' + 3I'' \quad (35)$$

$$\text{其中 } I' = \frac{V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2} \text{ 和 } I'' = \frac{I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2}; \quad I' = I'_{(+)} =$$

$$I'_{(-)} = I'_{(0)} \text{ 且 } I'' = I''_{(+)} = I''_{(-)} = I''_{(0)}。$$

其結果方程如下：

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2} + \frac{3I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2} \quad (36)$$

對於一個具光伏系統的配電網， $V_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(-)}^1$ ， $Z_{th(0)}^1$ ， $I_{N(+)}^1$ ， $V_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(-)}^2$ ， $Z_{th(0)}^2$ 與 $I_{N(+)}^2$ 可以用式(1)~(12)進行簡化，而式(13 - 24) 則用於具 BESS 的配電系統。

3. 母線 1 與母線 2 的兩相接地故障計算

兩相接地故障的互聯時序網路如圖 26 所示。

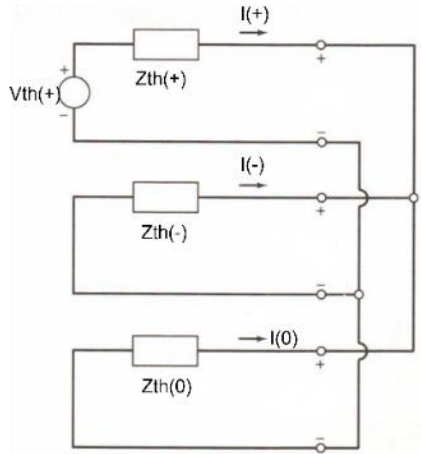


圖 26 兩相接地故障的互聯時序網路

由於配電系統由兩個獨立電源組成，因此可使用疊加原理。在母線 1 的兩相接地故障電流可推導如下：

$$I_{DLG}^1 = 3I' + 3I'' \quad (37)$$

其中 $I' = I'_{(0)}$ 且 $I'' = I''_{(0)}$ 且 $I_{DLG} = 3I_{(0)}$ 。為獲得到 I' 與 I'' ，因此使用分流規則。

$$I' = \frac{V_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1)}{Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1) + Z_{th(-)}^1 Z_{th(0)}^1} \quad I'' = \frac{I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1 (Z_{th(-)}^1)}{Z_{th(+)}^1 (Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1) + Z_{th(-)}^1 Z_{th(0)}^1} \quad (38)$$

結果公式如下：

$$I_{DLG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1)}{Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1) + Z_{th(-)}^1 Z_{th(0)}^1} + \frac{3I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1 (Z_{th(-)}^1)}{Z_{th(+)}^1 (Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1) + Z_{th(-)}^1 Z_{th(0)}^1} \quad (39)$$

同理，在母線 2 的兩相接地故障電流可推導如下：

$$I_{DLG}^2 = 3I' + 3I'' \quad (40)$$

其中 $I' = I'_{(0)}$ 且 $I'' = I''_{(0)}$ 。為獲得到 I' 與 I'' ，因此使用分流規則。

$$I' = \frac{V_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2)}{Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2) + Z_{th(-)}^2 Z_{th(0)}^2} \quad I'' = \frac{I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2 (Z_{th(-)}^2)}{Z_{th(+)}^2 (Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2) + Z_{th(-)}^2 Z_{th(0)}^2} \quad (41)$$

其結果公式如下：

$$I_{DLG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2)}{Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2) + Z_{th(-)}^2 Z_{th(0)}^2} + \frac{3I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2 (Z_{th(-)}^2)}{Z_{th(+)}^2 (Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2) + Z_{th(-)}^2 Z_{th(0)}^2} \quad (42)$$

對於具光伏系統的配電網， $V_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(-)}^1$ ， $Z_{th(0)}^1$ ， $I_{N(+)}^1$ ， $V_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(-)}^2$ ， $Z_{th(0)}^2$ 及 $I_{N(+)}^2$ 可使用式(1)~(12)進行簡化，而式(13)~(24) 則使用於具 BESS 的配電系統。

4. 母線 1 與母線 2 的線對線故障計算

線對線故障的互聯時序網路如圖 27 所示。

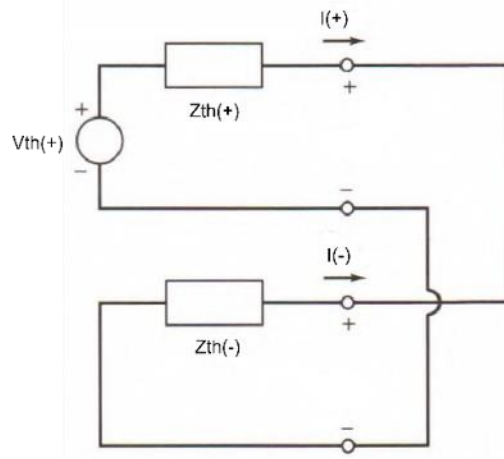


圖 27 線對線故障的互聯時序網路

由於配電系統由兩個獨立電源組成，因此可使用疊加原理。在母線 1 的線對線故障電流可推導如下：

$$I_{DLG}^1 = \sqrt{3}I' + \sqrt{3}I'' \quad (43)$$

$$I' = I'_{(0)} + aI'_{(+)} + a^2I'_{(-)} = \sqrt{3}I'_{(+)} \text{ 且 } I'' = I''_{(0)} + aI''_{(+)} + a^2I''_{(-)} = \sqrt{3}I''_{(+)} \text{ 其中 } I'_{(+)} = -I'_{(-)}, \quad I''_{(+)} = -I''_{(-)} \text{ 且 } I'_{(0)} = I''_{(0)} = 0; \text{ 同時,}$$

$$I' = \frac{V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1} \text{ 與 } I'' = \frac{I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1}。$$

其結果公式如下：

$$I_{DLG}^1 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1} + \frac{\sqrt{3}I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1} \quad (44)$$

同理，在母線 2 的線對線故障電流可推導如下：

$$I_{DLG}^2 = \sqrt{3}I' + \sqrt{3}I'' \quad (45)$$

$$I' = I'_{(0)} + aI'_{(+)} + a^2I'_{(-)} = \sqrt{3}I'_{(+)} \quad \text{且} \quad I'' = I''_{(0)} + aI''_{(+)} + a^2I''_{(-)} = \sqrt{3}I''_{(+)} \text{ 其中 } I'_{(+)} = -I'_{(-)}, \quad I''_{(+)} = -I''_{(-)} \text{ 且 } I'_{(0)} = I''_{(0)} = 0; \text{ 同時,}$$

$$I' = \frac{V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2} \text{ 和 } I'' = \frac{I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2}。$$

其結果公式如下：

$$I_{DLG}^2 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2} + \frac{\sqrt{3}I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2} \quad (46)$$

對於具光伏系統的配電系統， $V_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(-)}^1$ ， $Z_{th(0)}^1$ ， $I_{N(+)}^1$ ， $V_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(-)}^2$ ， $Z_{th(0)}^2$ 及 $I_{N(+)}^2$ 可使用式(1)~(12)進行簡化；式(13)~(24)則用於具 BESS 的配電網。

5. 母線 1 和母線 2 的單相高阻抗故障計算

單相高阻抗故障類似於單相對地故障，只是它在故障點處具有額外的高阻抗。單相高阻抗故障的時序互連網路如圖 28 所示。

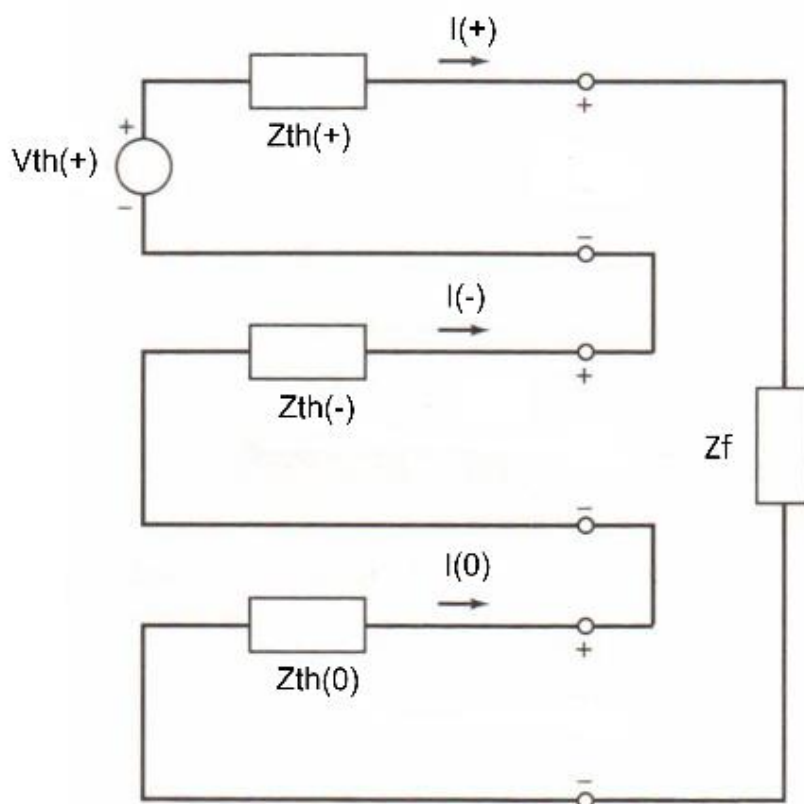


圖 28 單相高阻抗故障的時序互連網路

由於配電系統由兩個獨立電源組成，因此可利用疊加原理。母線 1 的單相高阻抗對地故障電流可推導如下：

$$I_{LG}^1 = 3I' + 3I'' \quad (47)$$

$$\text{其中 } I' = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1 + Z_f} \quad \text{且} \quad I'' = \frac{3I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1 + Z_f}; \quad I' =$$

$$I'_{(+)} = I'_{(-)} = I'_{(0)} \quad \text{和} \quad I'' = I''_{(+)} = I''_{(-)} = I''_{(0)}。$$

最後可得

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1 + Z_f} + \frac{3I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1 + Z_f} \quad (48)$$

同理於母線 2，單相高阻抗對地故障電流可推導如下：

$$I_{LG}^2 = 3I' + 3I'' \quad (49)$$

$$\text{其中 } I' = \frac{V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2 + Z_f} \quad \text{且} \quad I'' = \frac{I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2 + Z_f}; \quad I' =$$

$$I'_{(+)} = I'_{(-)} = I'_{(0)} \quad \text{和} \quad I'' = I''_{(+)} = I''_{(-)} = I''_{(0)}。$$

最後可得

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2 + Z_f} + \frac{3I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2 + Z_f} \quad (50)$$

對於一個具光伏系統的配電網， $V_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(-)}^1$ ， $Z_{th(0)}^1$ ， $I_{N(+)}^1$ ，

$V_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(-)}^2$ ， $Z_{th(0)}^2$ 與 $I_{N(+)}^2$ 可以用式(1)~(12)代入，而式(13) -

(24) 則用於具 BESS 的配電系統。

參、不同控制模式之分散式電源之短路電流分析

本章節討論基於變流器的分散式電源(BESS 與 PV 系統)中考慮的不同控制策略。PV 系統考慮 MPPT 模式、PQ 模式與 VQ 模式，而 BESS 系統則考慮 PQ 模式、VQ 模式與 Pf 模式。每種模式的控制結構來自於[21]與[22]之研究。

一、MPPT 控制

此項控制策略中，IBDG 可在任何給定時間內提供最大功率，並被建模為定電流控制方式。IBDG 的定電流通用控制方塊圖如圖 29 所示。

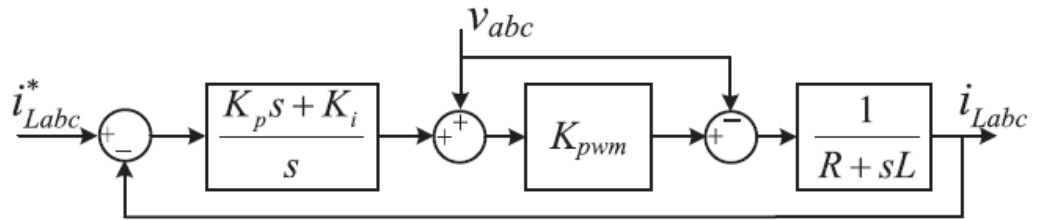


圖 29 IBDG 的定電流控制方塊圖

圖 29 為 IBDG 的定電流控制方塊圖。PI 控制器利用參考信號追蹤電流。藉由調變信號轉換為單位標么值， K_{pwm} 等於 1 且電壓前饋控制可呈現高性能。根據圖 29，輸入-輸出轉移函數(transfer function)可推導如下：

$$i_{Labc} = G_i(s) i_{Labc}^* \quad (51)$$

其中

$$G_i(s) = \frac{K_p^I s + K_i^I}{L s^2 + (K_p^I + R) s + K_i^I} \quad (52)$$

1. 對稱故障

由式(51)可知，定電流控制的 IBDG 的輸出電流只與參考電流有關。由於參考電流保持恆定，因此無論電網電壓是否驟降，IBDG 可提供電網定電流。換言之，定電流控制的 IBDG 在暫態期間可視為定電流。

利用終值定理的原理(Principle of Final Value Theorem)，當 $t \rightarrow \infty$ ，即故障後穩態，將 $s = 0$ 可獲得 IBDG 的穩態電流值。

因此，

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g_i(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s G_i(s) = s \times \frac{K_p^I s + K_i^I}{Ls^2 + (K_p^I + R)s + K_i^I} = \frac{K_p^I s^2 + K_i^I s}{Ls^2 + (K_p^I + R)s + K_i^I} = 0 \quad (53)$$

因為 $i_{Labc} = I_{PV}$ ，基於式(27)的母線 1 的 IBDG PV 系統，其在穩態時的三相故障電流可簡化如下：

$$I_{3\Phi}^1 = \frac{V_{utility}}{Z_{10(+)}} \quad (54)$$

相同的概念可應用於基於式(31)的母線 2 的 IBDG 系統，其暫態的三相故障電流可簡化如下：

$$I_{3\Phi}^2 = \frac{V_{utility}(Z_{30(+)} + R_f)}{(Z_{10(+)} + Z_{13(+)})(Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + (Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)}))} \quad (55)$$

定電流控制的 IBDG 在暫態期間可視為定電流源，因此 $G_i(s) = 1$ 。另一方面，由初始高峰瞬間故障電流可依[23]推導為

$$i_p = \kappa \sqrt{2} \quad (56)$$

其中

$$k = 1.02 + 0.98e^{-3\frac{R}{x}} \quad (57)$$

基於式(27)的母線 1 上的 IBDG PV 系統，其初始的高峰瞬間三相故障

電流可簡化為

$$I_{3\Phi}^1 = \frac{V_{utility}}{Z_{10(+)}} \times \kappa\sqrt{2} + I_{PV} \left(\frac{R_f(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})}{R_f(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}) + Z_{30}(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}) + Z_{13(+)}(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})} \right) \quad (58)$$

而基於式(31)的母線 2 上的 IBDG PV 系統，其初始高峰瞬間三相故障

電流可簡化為

$$I_{3\Phi}^2 = \frac{V_{utility}(Z_{30(+)} + R_f)}{(Z_{10(+)} + Z_{13(+)})(Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + (Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)}))} \times \kappa\sqrt{2} + I_{PV} \left(\frac{R_f(Z_{13(+)} + Z_{10(+)})}{R_f(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{10(+)}) + Z_{30(+)}(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{10(+)}) + Z_{32(+)}(Z_{13(+)} + Z_{10(+)})} \right) \quad (59)$$

2. 不對稱故障

當系統發生非對稱故障時，例如雙線接地故障，可採用對稱分量法來說明 IBDG 的故障特性。如[21]所述，因為控制系統在自然參考框架下，定電流控制的 IBDG 可獨立調節三相輸出電流。即使考慮不對稱故障，固定的參考電流的也會讓定電流控制的 IBDG 的輸出電流固定，如式(51)所述。因此必須調整變流器內部電壓以平衡輸出電流。根據式(52)，可得知變流器內部電壓 V_{intabc} 為不平衡電壓。

$$L \frac{di_{Labc}}{dt} + Ri_{Labc} = v_{intabc} - v_{gabc} \quad (60)$$

依對稱故障的相同概念，式(39)與式(42)的單相對地故障的穩態值可簡化為式(61)與式(62)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1} \quad (61)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2} \quad (62)$$

式(34)與式(36)的雙線對地故障的穩態值簡化為式(63)與式(64)。

$$I_{DLG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1)}{Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1) + Z_{th(-)}^1 Z_{th(0)}^1} \quad (63)$$

$$I_{DLG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2)}{Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2) + Z_{th(-)}^2 Z_{th(0)}^2} \quad (64)$$

式(44)與式(46)中的線對線故障穩態電流值可分別簡化為式(65)與式(66)。

$$I_{LL}^1 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1} \quad (65)$$

$$I_{LL}^2 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2} \quad (66)$$

最後，式(48)與式(50)中單相高阻抗故障的穩態電流值可簡化為式(67)

與式(68)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1 + Z_f} \quad (67)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2 + Z_f} \quad (68)$$

依據對稱故障的相同概念，式(39)與式(42)中的雙線對地故障的高峰

瞬間值可分別簡化為式(69)與式(70)。

$$I_{DLG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1)}{Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1) + Z_{th(-)}^1 Z_{th(0)}^1} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1)}{Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1) + Z_{th(-)}^1 Z_{th(0)}^1} \quad (69)$$

$$I_{DLG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2)}{Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2+Z_{th(0)}^2)+Z_{th(-)}^2Z_{th(0)}^2} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^2Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2)}{Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2+Z_{th(0)}^2)+Z_{th(-)}^2Z_{th(0)}^2} \quad (70)$$

式(34)與式(36)中的單相對地故障的高峰瞬間電流值可分別簡化為(71)與(72)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1+Z_{th(-)}^1+Z_{th(0)}^1} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^1Z_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1+Z_{th(-)}^1+Z_{th(0)}^1} \quad (71)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2+Z_{th(-)}^2+Z_{th(0)}^2} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^2Z_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2+Z_{th(-)}^2+Z_{th(0)}^2} \quad (72)$$

式(44)與式(46)的線對線故障高峰瞬間電流值可分別簡化為式(73)與式(74)。

$$I_{LL}^1 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1+Z_{th(-)}^1} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{\sqrt{3}I_{N(+)}^1Z_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1+Z_{th(-)}^1} \quad (73)$$

$$I_{LL}^2 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2+Z_{th(-)}^2} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{\sqrt{3}I_{N(+)}^2Z_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2+Z_{th(-)}^2} \quad (74)$$

最後，式(48)與式(50)中的單相高阻抗故障的高峰瞬間值可分別簡化為式(75)與式(76)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1+Z_{th(-)}^1+Z_{th(0)}^1+Z_f} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^1Z_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1+Z_{th(-)}^1+Z_{th(0)}^1+Z_f} \quad (75)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2+Z_{th(-)}^2+Z_{th(0)}^2+Z_f} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^2Z_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2+Z_{th(-)}^2+Z_{th(0)}^2+Z_f} \quad (76)$$

對於具 IBDG 的 PV 系統的配電系統， $V_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(-)}^1$ ， $Z_{th(0)}^1$ ， $I_{N(+)}^1$ ，

$V_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(-)}^2$ ， $Z_{th(0)}^2$ 及 $I_{N(+)}^2$ ，可使用式(1)–式(12)進行簡化。

二、PQ 控制

PQ 控制器廣泛應用於 PV 系統及 BESS，基於 PQ 控制的 IBDG 提供預設電力給公用電網。PQ 控制器的控制方塊如圖 30 所示。

整個系統以 dq 坐標(同步參考坐標)實現，其同步角度與 q 軸對齊。外部功率迴路用於產生與限制參考電流的值，以方便電流控制器進行跟踪。PI 控制器可實現參考電流與輸出電流之間的零穩態誤差。PQ 控制器與定電流控制器的區別在於，定電流控制器中的參考電流不會因電網電壓是否改變(驟降)而產生影響，然而 PQ 控制器的參考電流會與 PCC 電壓相關。

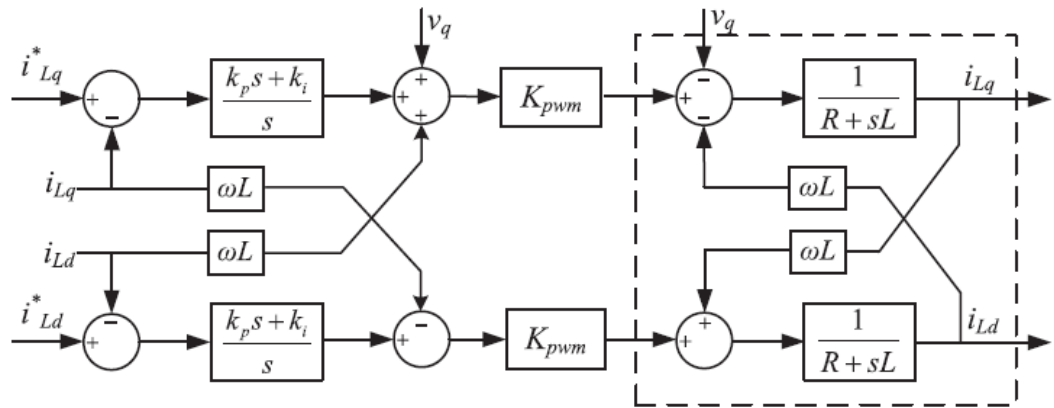


圖 30 基於 PQ 控制的 IBDG 的方塊圖

對於給定的額定實功率 P^* 與虛功率 Q^* ，PQ 控制器的參考電流如式 (77) 所示。

$$\begin{bmatrix} i_{Ld}^* \\ i_{Lq}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_d^2 + v_q^2} \begin{bmatrix} v_d & v_q \\ v_q & -v_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \end{bmatrix} \quad (77)$$

依據式(77)，電壓大小突然下降會導致參考電流增加。轉移函數可從

IBDG 的 PQ 控制方塊圖導出，如式(78)所示。(K_{pwm} 等於 1 可完成高性能的電壓回授控制)，可觀察到輸出電流與參考電流是相關的。

$$i_{Ldq} = \frac{K_p^I s + K_i^I}{Ls^2 + (R + K_p^I)s + K_i^I} i_{Ldq}^* = G_i(s) \quad (78)$$

利用終值原理，當 $t \rightarrow \infty$ 時，將 $s \rightarrow 0$ ，以獲得 IBDG 的穩態響應值。因此，

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g_i(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s G_i(s) = s \times \frac{K_p^I s + K_i^I}{Ls^2 + (R + K_p^I)s + K_i^I} = \frac{0}{K_i^I} = 0 \quad (79)$$

為獲得 IBDG 初始響應值，可利用初始值原理，當 $t \rightarrow 0$ 時， $s \rightarrow \infty$ 。

因此，

$$\lim_{t \rightarrow 0} g_i(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} s G_i(s) = s \times \frac{K_p^I s + K_i^I}{Ls^2 + (R + K_p^I)s + K_i^I} = \frac{K_p^I s^2 + K_i^I s}{Ls^2 + (R + K_p^I)s + K_i^I} = \frac{K_p^I}{L} \quad (80)$$

1. 對稱故障

因 $i_{Ldq} = I_{PV}$ 或 $i_{Ldq} = I_{BESS}$ ，基於式(27)的母線 1 上 IBDG PV 系統的三相故障電流與基於式(28)的母線 1 上 IBDG BESS 系統的三相穩態故障電流可簡化如下：

$$I_{3\Phi}^1 = \frac{V_{utility}}{Z_{10(+)}} \quad (81)$$

相同概念可應用於基於式(31)的母線 2 上 IBDG PV 系統的三相故障電流與基於式(32)的母線 1 上 IBDG BESS 系統的三相穩態故障電流，可簡化如下：

$$I_{3\Phi}^2 = \frac{V_{utility}(Z_{30(+)} + R_f)}{(Z_{10(+)} + Z_{13(+)})(Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + (Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)}))} \quad (82)$$

使用式(56)與式(80)，基於式(27)的母線 1 上 IBDG PV 系統的高峰瞬間三相故障電流與基於式(28)的母線 1 上 IBDG BESS 系統的高峰瞬間三相故障電流，可簡化為式(83)與式(84)。

$$I_{3\Phi}^1 = \frac{V_{utility}}{Z_{10(+)}} \times \kappa\sqrt{2} + I_{PV} \left(\frac{R_f(Z_{32(+)}+Z_{20(+)})}{R_f(Z_{13(+)}+Z_{32(+)}+Z_{20(+)})+Z_{30}(Z_{13(+)}+Z_{32(+)}+Z_{20(+)})+Z_{13}(Z_{32}+Z_{20})} \right) \times \frac{K_p^I}{L} \quad (83)$$

$$I_{3\Phi}^1 = \frac{V_{utility}}{Z_{10(+)}} \times \kappa\sqrt{2} + I_{BESS} \left(\frac{R_f(Z_{32(+)}+Z_{20(+)})}{R_f(Z_{13(+)}+Z_{32(+)}+Z_{20(+)})+Z_{30}(Z_{13(+)}+Z_{32(+)}+Z_{20(+)})+Z_{13}(Z_{32}+Z_{20})} \right) \times \frac{K_p^I}{L} \quad (84)$$

另一方面，基於式(31)的母線 2 上 IBDG PV 系統的高峰瞬間三相故障電流與基於式(32)的母線 2 上 IBDG BESS 系統的高峰瞬間三相故障電流，可簡化為式(85)與式(86)。

$$I_{3\Phi}^2 = \frac{V_{utility}(Z_{30(+)}+R_f)}{(Z_{10(+)}+Z_{13(+)})(Z_{30(+)}+R_f+Z_{32(+)}+(Z_{30(+)}+R_f)(Z_{32(+)}))} \times \kappa\sqrt{2} + I_{PV} \left(\frac{R_f(Z_{13(+)}+Z_{10(+)})}{R_f(Z_{13(+)}+Z_{32(+)}+Z_{10(+)})+Z_{30}(Z_{13(+)}+Z_{32(+)}+Z_{10(+)})+Z_{32}(Z_{13}+Z_{10})} \right) \times \frac{K_p^I}{L} \quad (85)$$

$$I_{3\Phi}^2 = \frac{V_{utility}(Z_{30(+)}+R_f)}{(Z_{10(+)}+Z_{13(+)})(Z_{30(+)}+R_f+Z_{32(+)}+(Z_{30(+)}+R_f)(Z_{32(+)}))} \times \kappa\sqrt{2} + I_{BESS} \left(\frac{R_f(Z_{13(+)}+Z_{10(+)})}{R_f(Z_{13(+)}+Z_{32(+)}+Z_{10(+)})+Z_{30}(Z_{13(+)}+Z_{32(+)}+Z_{10(+)})+Z_{32}(Z_{13}+Z_{10})} \right) \times \frac{K_p^I}{L} \quad (86)$$

2. 不對稱故障

依據對稱故障中的相同概念，式(39)與式(42)的單相對地故障的穩態電流值可分別簡化為式(87)與式(88)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1} \quad (87)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2} \quad (88)$$

式(34)與式(36)中雙線對地故障的穩態電流值可分別簡化為式(89)與式(90)。

$$I_{DLG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1)}{Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1) + Z_{th(-)}^1 Z_{th(0)}^1} \quad (89)$$

$$I_{DLG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2)}{Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2) + Z_{th(-)}^2 Z_{th(0)}^2} \quad (90)$$

式(44)與式(46)的線對線故障穩態電流值可分別簡化為式(91)與式(92)。

$$I_{LL}^1 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1} \quad (91)$$

$$I_{LL}^2 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2} \quad (92)$$

最後，式(48)與式(50)中單相高阻抗故障的穩態電流值可分別簡化為式(93)與式(94)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1 + Z_f} \quad (93)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2 + Z_f} \quad (94)$$

依據對稱故障的相同概念，式(39)與式(42)中的雙線對地故障的高峰瞬間電流值可分別簡化為式(95)與式(96)。

$$I_{DLG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1)}{Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1) + Z_{th(-)}^1 Z_{th(0)}^1} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1)}{Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1) + Z_{th(-)}^1 Z_{th(0)}^1} \times \frac{K_p^I}{L} \quad (95)$$

$$I_{DLG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2)}{Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2) + Z_{th(-)}^2 Z_{th(0)}^2} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2)}{Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2) + Z_{th(-)}^2 Z_{th(0)}^2} \times \frac{K_p^I}{L} \quad (96)$$

式(34)與式(36)中的單相對地故障的高峰瞬間電流值可分別簡化為式(97)與式(98)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1} \times \frac{K_p^I}{L} \quad (97)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2} \times \frac{K_p^I}{L} \quad (98)$$

式(44)與式(46)的線對線故障高峰瞬間電流值可分別簡化為式(99)與式(100)。

$$I_{LL}^1 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{\sqrt{3}I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1} \times \frac{K_p^I}{L} \quad (99)$$

$$I_{LL}^2 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{\sqrt{3}I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2} \times \frac{K_p^I}{L} \quad (100)$$

最後，式(48)與式(50)中單相高阻抗故障的高峰瞬間電流值可分別簡化為式(101)與式(102)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1 + Z_f} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1 + Z_f} \times \frac{K_p^I}{L} \quad (101)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2 + Z_f} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2 + Z_f} \times \frac{K_p^I}{L} \quad (102)$$

對於具 PV 系統的配電系統， $V_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(-)}^1$ ， $Z_{th(0)}^1$ ， $I_{N(+)}^1$ ， $V_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(-)}^2$ ， $Z_{th(0)}^2$ 和 $I_{N(+)}^2$ 可以使用式(1) - 式(12)簡化，而式(13)-式(24)用於具 BESS 系統的配電系統簡化。

三、VQ 及 Pf 控制

IBDG 系統的電壓大小與頻率變化可透過為 P-f/Q-V 附加的二次控制來改善[22]，如圖 31 所示。

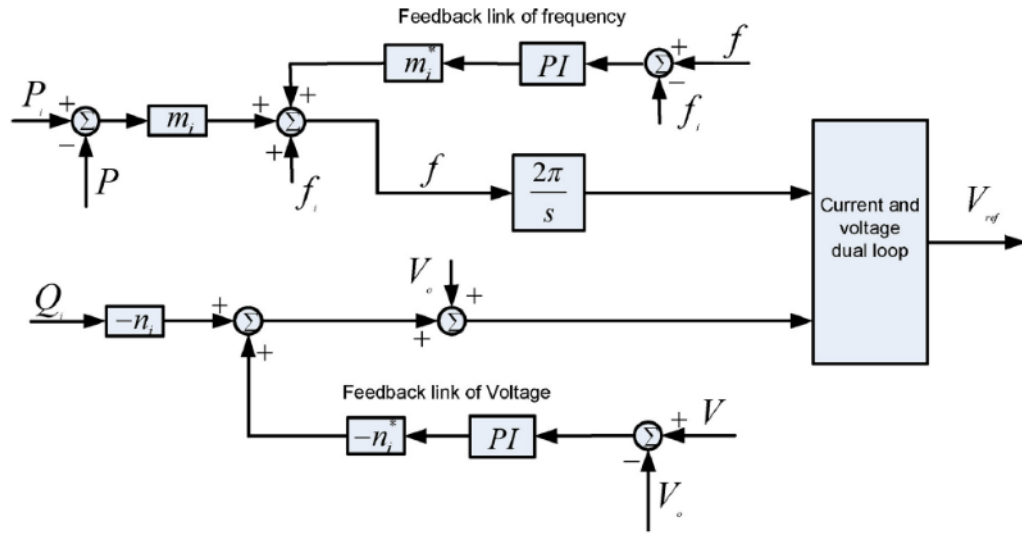


圖 31 P-f/Q-V 二次控制的控制方塊圖

P-f/Q-V 下垂控制(Droop Control)的表示式如下：

$$f - f_i = \frac{m_i}{1 - m_i^* \left(\frac{K_p^I s + K_i^I}{s} \right)} (P_i - P) \quad (103)$$

$$V - V_o = - \frac{n_i}{1 + n_i^* \left(\frac{K_p^V s + K_i^V}{s} \right)} Q_i \quad (104)$$

係數 m_i^* 與 n_i^* 是放大校正下垂係數，因為原有的回授係數 m_i^* 與 n_i^* 的數值太小，因此 m_i^* 與 n_i^* 主要作為放大電壓與頻率補償的回授。如圖 31 所示，二

次控制 P-f/Q-V 可連接至圖 32 所示的電流與電壓雙迴路。

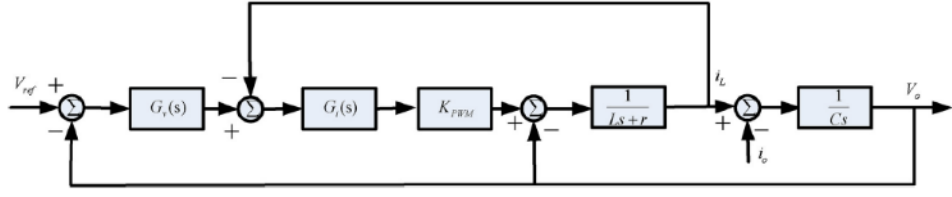


圖 32 電壓電流雙迴路控制方塊圖

圖 32 的轉移函數可表示如下：

$$G_v(s) = \frac{\left(K_p^V + \frac{K_i^V}{s}\right)G_i(s)}{Cs + \left(K_p^V + \frac{K_i^V}{s}\right)G_i(s)} \quad (105)$$

將式(77)代入式(105)，則數學式可簡化為

$$G_v(s) = \frac{(K_p^V K_p^I)s^2 + (K_p^V K_i^I + K_i^V K_p^I)s + K_i^V K_i^I}{(CL)s^4 + C(R + K_p^I)s^3 + (CK_i^I + K_p^V K_p^I)s^2 + (K_p^V K_i^I + K_i^V K_p^I)s + K_i^V K_i^I} \quad (106)$$

如圖 31 所示，VQ 控制可簡化為

$$H(s) = -\frac{n_i s}{s + n_i^*(K_p^V s + K_i^V)} G_v(s) \quad (107)$$

對於 Pf 控制，如式(77)所示，實功率直接相對於電流的變化，因此 Pf 控制可簡化為

$$H(s) = \frac{m_i s}{s - m_i^*(K_p^I s + K_i^I)} G_i(s) \quad (108)$$

1. VQ 控制

利用終值原理，當 $t \rightarrow \infty$ ， $s \rightarrow 0$ 可獲得 IBDG 的穩態響應值。因此，式(107)可簡化為

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h_i(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s H_i(s) = s \times -\frac{n_i s}{s + n_i^*(K_p^V s + K_i^V)} G_v(s) = 0 \quad (109)$$

為獲得 IBDG 的初始響應值，可利用初始值原理，將 $s \rightarrow \infty$ 得到 $t \rightarrow 0$ 。

因此，式(107)可簡化為

$$\lim_{t \rightarrow 0} h_i(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} s H_i(s) = s \times -\frac{n_i s}{s + n_i^*(K_p^V s + K_i^V)} G_v(s) = 0 \quad (110)$$

基於式(27)的母線 1 上 IBDG PV 系統的三相穩態故障電流與基於式(28)

的母線 1 上 IBDG BESS 系統的三相穩態故障電流，數學式可簡化為

$$I_{3\Phi}^1 = \frac{V_{\text{utility}}}{Z_{10(+)}} \quad (111)$$

相同概念可應用於基於式(31)的母線 2 上 IBDG PV 系統的三相穩態故障電流與基於式(32)的母線 1 上 IBDG BESS 系統的三相穩態故障電流，數學式可簡化為

$$I_{3\Phi}^2 = \frac{V_{\text{utility}}(Z_{30(+)} + R_f)}{(Z_{10(+)} + Z_{13(+)})(Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + (Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)}))} \quad (112)$$

使用式(56)與式(110)，基於式(27)的母線 1 上 IBDG PV 系統的高峰瞬間三相故障電流與基於式(28)的母線 1 上 IBDG BESS 系統的高峰瞬間三相故障電流，數學式可分別簡化為式(113)與式(114)。

$$I_{3\Phi}^1 = \frac{V_{\text{utility}}}{Z_{10(+)}} \times \kappa\sqrt{2} \quad (113)$$

$$I_{3\Phi}^1 = \frac{V_{\text{utility}}}{Z_{10(+)}} \times \kappa\sqrt{2} \quad (114)$$

另外，基於式(31)的母線 2 上 IBDG PV 系統的高峰瞬間三相故障電流與基於式(32)的母線 2 上 IBDG BESS 系統的高峰瞬間三相故障電流，數學式可分別簡化為式(115)與式(116)。

$$I_{3\Phi}^2 = \frac{V_{\text{utility}}(Z_{30(+)} + R_f)}{(Z_{10(+)} + Z_{13(+)})(Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + (Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)}))} \times \kappa\sqrt{2} \quad (115)$$

$$I_{3\Phi}^2 = \frac{V_{utility}(Z_{30(+)}+R_f)}{(Z_{10(+)}+Z_{13(+)})(Z_{30(+)}+R_f+Z_{32(+)}+(Z_{30(+)}+R_f)(Z_{32(+)}))} \times \kappa\sqrt{2} \quad (116)$$

依據對稱故障的相同概念，式(39)與式(42)中的單相對地故障的穩態電流值可分別簡化為式(117)與式(118)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1} \quad (117)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2} \quad (118)$$

式(34)與式(36)中雙相對地故障的穩態電流值可分別簡化為式(119)與式(120)。

$$I_{DLG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1)}{Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1) + Z_{th(-)}^1 Z_{th(0)}^1} \quad (119)$$

$$I_{DLG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2)}{Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2) + Z_{th(-)}^2 Z_{th(0)}^2} \quad (120)$$

式(44)與式(46)中的線對線故障的穩態電流值可分別簡化為式(121)與式(122)。

$$I_{LL}^1 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1} \quad (121)$$

$$I_{LL}^2 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2} \quad (122)$$

最後，式(48)與式(50)中單相高阻抗故障的穩態電流值可分別簡化為式(123)與式(124)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1 + Z_f} \quad (123)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2 + Z_f} \quad (124)$$

根據對稱故障的相同概念，式(39)與式(42)的雙相對地故障的高峰值瞬間電流值可分別簡化為式(125)與式(126)。

$$I_{DLG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1)}{Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1) + Z_{th(-)}^1 Z_{th(0)}^1} \times \kappa\sqrt{2} \quad (125)$$

$$I_{DLG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2)}{Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2) + Z_{th(-)}^2 Z_{th(0)}^2} \times \kappa\sqrt{2} \quad (126)$$

式(34)與式(36)的單相對地故障的高峰瞬間電流值可分別簡化為式(127)與式(128)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1} \times \kappa\sqrt{2} \quad (127)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2} \times \kappa\sqrt{2} \quad (128)$$

式(44)與式(46)的線對線故障高峰瞬間電流值可分別簡化為式(129)與式(130)。

$$I_{LL}^1 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1} \times \kappa\sqrt{2} \quad (129)$$

$$I_{LL}^2 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2} \times \kappa\sqrt{2} \quad (130)$$

最後，式(48)與式(50)中單相高阻抗故障的高峰瞬間電流值可分別簡化為式(131)與式(132)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1 + Z_f} \times \kappa\sqrt{2} \quad (131)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2 + Z_f} \times \kappa\sqrt{2} \quad (132)$$

對於具 IBDG PV 系統的配電系統， $V_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(-)}^1$ ， $Z_{th(0)}^1$ ， $I_{N(+)}^1$ ， $V_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(-)}^2$ ， $Z_{th(0)}^2$ 和 $I_{N(+)}^2$ ，可使用式(1)-式(12)進行簡化。

式(13)-式(24)則用於具 IBDG BESS 系統的配電系統。

2. Pf 控制

利用終值原理，當 $t \rightarrow \infty$ 時 $s \rightarrow 0$ ，可獲得 IBDG 的穩態響應值。因此式(108)可簡化為

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h_i(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s H_i(s) = s \times \frac{m_i s}{s - m_i^* (K_p^I s + K_i^I)} G_i(s) = 0 \quad (133)$$

為獲得 IBDG 的初始響應值，利用初始值原理，當 $t \rightarrow 0$ 時， $s \rightarrow \infty$ 。因此，式(108)可簡化為

$$\lim_{t \rightarrow 0} h_i(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} s H_i(s) = s \times \frac{m_i s}{s - m_i^* (K_p^I s + K_i^I)} G_i(s) = \frac{K_p^I m_i}{L - m_i^* K_p^I} \quad (134)$$

基於式(28)的母線 1 上 IBDG BESS 系統，在穩態時的三相故障電流簡化為

$$I_{3\Phi}^1 = \frac{V_{utility}}{Z_{10(+)}} \quad (135)$$

相同概念可應用於基於式(32)的母線 1 上 IBDG BESS 系統的三相故障電流，在穩態時可簡化為

$$I_{3\Phi}^2 = \frac{V_{utility}(Z_{30(+)} + R_f)}{(Z_{10(+)} + Z_{13(+)})(Z_{30(+)} + R_f + Z_{32(+)} + (Z_{30(+)} + R_f)(Z_{32(+)}))} \quad (136)$$

使用式(56)與式(134)，基於式(28)的母線 1 上 IBDG BESS 系統的高峰瞬間三相故障電流可簡化為

$$I_{3\Phi}^1 = \frac{V_{utility}}{Z_{10(+)}} \times \kappa \sqrt{2} + I_{BESS} \left(\frac{R_f(Z_{32(+)} + Z_{20(+)})}{R_f(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}) + Z_{30}(Z_{13(+)} + Z_{32(+)} + Z_{20(+)}) + Z_{13}(Z_{32} + Z_{20})} \right) \times \frac{K_p^I m_i}{L - m_i^* K_p^I} \quad (137)$$

另外，基於式(32)的母線 2 上 IBDG BESS 系統的高峰瞬間三相故障電流可簡化為

$$I_{3\Phi}^2 = \frac{V_{utility}(Z_{30(+)}+R_f)}{(Z_{10(+)}+Z_{13(+)})(Z_{30(+)}+R_f+Z_{32(+)}+(Z_{30(+)}+R_f)(Z_{32(+)}))} \times \kappa\sqrt{2} + I_{BESS} \left(\frac{R_f(Z_{13(+)}+Z_{10(+)})}{R_f(Z_{13(+)}+Z_{32(+)}+Z_{10(+)})+Z_{30}(Z_{13(+)}+Z_{32(+)}+Z_{10(+)})+Z_{32}(Z_{13}+Z_{10})} \right) \times \frac{K_p^I m_i}{L-m_i^* K_p^I} \quad (138)$$

依據對稱故障的相同概念，式(39)與式(42)中單相對地故障的穩態電流值可分別簡化為式(139)與式(140)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1} \quad (139)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2} \quad (140)$$

式(34)與式(36)中雙相對地故障的穩態電流值可分別簡化為式(141)與式(142)。

$$I_{DLG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1)}{Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1) + Z_{th(-)}^1 Z_{th(0)}^1} \quad (141)$$

$$I_{DLG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2)}{Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2) + Z_{th(-)}^2 Z_{th(0)}^2} \quad (142)$$

式(44)與式(46)中的線對線故障穩態電流值可分別簡化為式(143)與式(144)。

$$I_{LL}^1 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1} \quad (143)$$

$$I_{LL}^2 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2} \quad (144)$$

最後，式(48)與式(50)中單相高阻抗故障的穩態電流值可分別簡化為式(145)與式(146)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1 + Z_f} \quad (145)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2 + Z_f} \quad (146)$$

依據對稱故障的相同概念，式(39)與式(42)中雙相對地故障的高峰瞬間電流值可以分別簡化為式(147)與式(148)。

$$I_{DLG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1)}{Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1) + Z_{th(-)}^1 Z_{th(0)}^1} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1)}{Z_{th(+)}^1(Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1) + Z_{th(-)}^1 Z_{th(0)}^1} \times \frac{K_p^I m_i}{L - m_i^* K_p^I} \quad (147)$$

$$I_{DLG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2)}{Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2) + Z_{th(-)}^2 Z_{th(0)}^2} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2)}{Z_{th(+)}^2(Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2) + Z_{th(-)}^2 Z_{th(0)}^2} \times \frac{K_p^I m_i}{L - m_i^* K_p^I} \quad (148)$$

式(34)與式(36)中的單相對地故障的高峰瞬間電流值可分別簡化為式(149)與式(150)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1} \times \frac{K_p^I m_i}{L - m_i^* K_p^I} \quad (149)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2} \times \frac{K_p^I m_i}{L - m_i^* K_p^I} \quad (150)$$

式(44)與式(46)中的線對線故障高峰瞬間電流值可分別簡化為式(151)與式(152)。

$$I_{LL}^1 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{\sqrt{3}I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1} \times \frac{K_p^I m_i}{L - m_i^* K_p^I} \quad (151)$$

$$I_{LL}^2 = \frac{\sqrt{3}V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{\sqrt{3}I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2} \times \frac{K_p^I m_i}{L - m_i^* K_p^I} \quad (152)$$

最後，式(48)與式(50)中單相高阻抗故障的高峰瞬間電流值可分別簡化為式(153)與式(154)。

$$I_{LG}^1 = \frac{3V_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1 + Z_f} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^1 Z_{th(+)}^1}{Z_{th(+)}^1 + Z_{th(-)}^1 + Z_{th(0)}^1 + Z_f} \times \frac{K_p^I m_i}{L - m_i^* K_p^I} \quad (153)$$

$$I_{LG}^2 = \frac{3V_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2 + Z_f} \times \kappa\sqrt{2} + \frac{3I_{N(+)}^2 Z_{th(+)}^2}{Z_{th(+)}^2 + Z_{th(-)}^2 + Z_{th(0)}^2 + Z_f} \times \frac{K_p^I m_i}{L - m_i^* K_p^I} \quad (154)$$

對於具 IBDG BESS 系統的配電系統， $V_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(+)}^1$ ， $Z_{th(-)}^1$ ， $Z_{th(0)}^1$ ， $I_{N(+)}^1$ ， $V_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(+)}^2$ ， $Z_{th(-)}^2$ ， $Z_{th(0)}^2$ 和 $I_{N(+)}^2$ ，可以用式(13)-式(24)進行簡化。

肆、使用 MATLAB Simulink 模擬與解析解的比較

為驗證解析解的結果，圖 1 與圖 13 的系統將使用 MATLAB Simulink 進行模擬。以下各測試情境如表 1 所示。

表 1 使用 MATLAB Simulink 的測試情境

情境	IBDG	控制方式	故障形式
1	PV System	MPPT Control	Three - Phase Fault
			Single - line - to - ground fault
			Double - line - to - ground fault
			Line - to - line fault
2	PV System	PQ Control	Single phase high impedance fault
			Three - Phase Fault
			Single - line - to - ground fault
			Double - line - to - ground fault
			Line - to - line fault
			Single phase high impedance fault

3	PV System	VQ Control	Three - Phase Fault
			Single - line - to - ground fault
			Double - line - to - ground fault
			Line - to - line fault
4	BESS System	PQ Control	Single phase high impedance fault
			Three - Phase Fault
			Single - line - to - ground fault
			Double - line - to - ground fault
5	BESS System	VQ Control	Line - to - line fault
			Single phase high impedance fault
			Three - Phase Fault
			Single - line - to - ground fault
6	BESS System	Pf Control	Double - line - to - ground fault
			Line - to - line fault
			Single phase high impedance fault
			Three - Phase Fault

每個情境皆使用離散模式計算，總持續時間為 25 秒，採樣時間為 20 μ s。母線 1 會在 5 秒時發生故障，並在 10 秒時結束，而母線 2 會在 16 秒時發生另一個故障，並在 20 秒時結束。

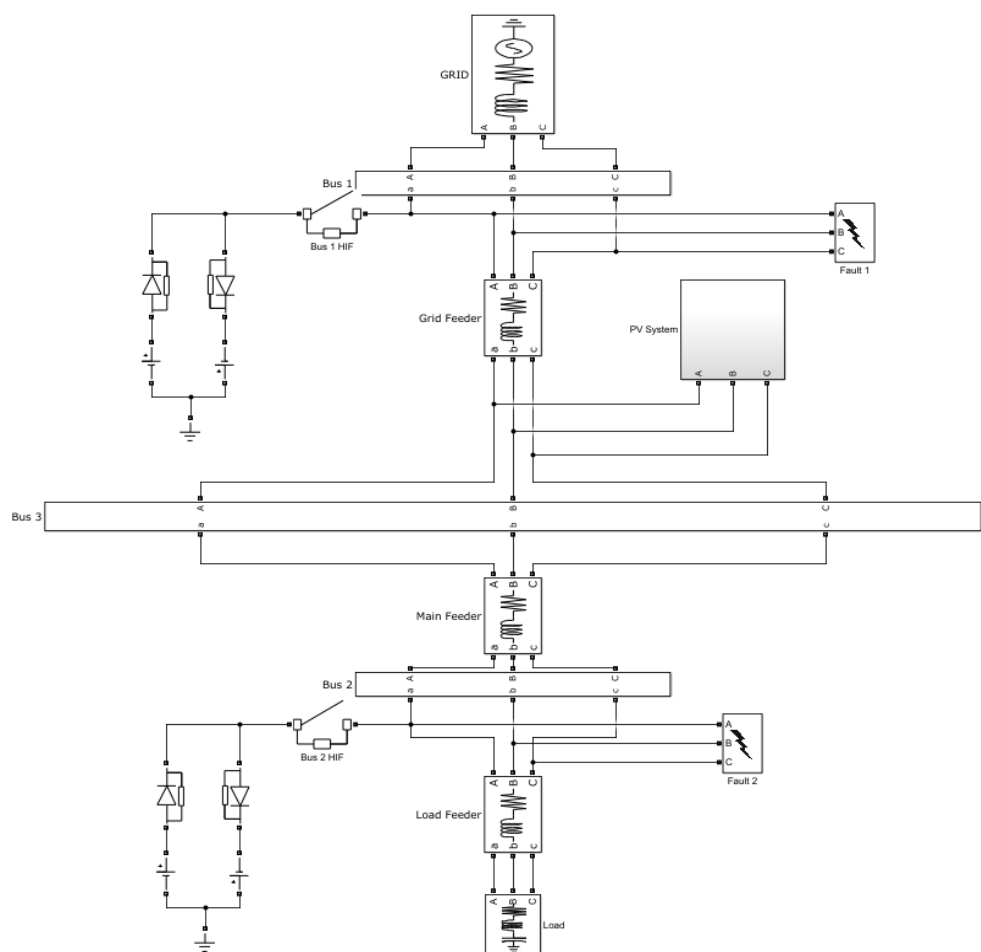


圖 33 IBDG 的 Simulink 模型(具有 MPPT 控制的 PV 系統)

一、情境 1

情境 1 為使用 MPPT 控制的 IBDG PV 系統, Simulink 模型如圖 33 所示。內建故障模塊用於模擬平衡三相、單相對地、雙相對地與相對相故障, 而對於單相高阻抗故障則使用[24]中描述的模式。表 2 為解析解與 MATLAB Simulink 模擬結果的比較, 分別是母線 1 與 2 的峰值瞬間電流值與穩態電流值。

表 2 使用 MPPT 控制的 IBDG (PV 系統)的解析解與 MATLAB 模擬比較

故障型式	峰值/穩態	Simulink 解 (Bus 1)	解析解 (Bus 1)	Simulink 解 (Bus 2)	解析解 (Bus 2)
	Peak	5332 A	5416 A	3492 A	4477 A
	Instantaneous				

Three - Phase Fault	Steady - State	2291 A	2309 A	1901 A	1909 A
Single - line - to - Ground Fault	Peak Instantaneous	5332 A	5102 A	3514 A	4659 A
	Steady - State	2282 A	2246 A	1902 A	1987 A
Double - line - to - Ground Fault	Peak Instantaneous	5332 A	5127 A	3502 A	4381 A
	Steady - State	2280 A	2186 A	1899 A	1868 A
Line - to - line Fault	Peak Instantaneous	4359 A	4691 A	3163 A	4290 A
	Steady - State	1981 A	2000 A	1739 A	1829 A
Single - Phase High Impedance Fault	Peak Instantaneous	1863 A	2533 A	1600 A	2276 A
	Steady - State	1163 A	1080 A	1001 A	970 A

如表 2 所示，解析解與 Simulink 模擬的穩態值彼此接近。另外，峰值瞬間電流值的差異在於式(56)，這是基於[23]峰值的不對稱電流近似值。MPPT 控制的參數如表 3 所示。

表 3 使用 MPPT 控制的 IBDG(PV 系統)參數

電力系統元件	參數
Utility	25 kV (line voltage) X/R = 7 Sbase = 100 MVA
Grid Feeder	R = 1 Ω L = 1 mH
Main Feeder	R = 1 Ω L = 1 mH
Load Feeder	R = 1 Ω L = 1 mH
Load	25 kV (line voltage) 150 kW
PV System	PV Array: $R_s = 3.039296 \mu\Omega$ $R_f = 0.3849017323 \Omega$ $I_{PV} = 6.9282 A$ Boost Converter:

$$Z_{converter} = 1.902391516 \angle 88.2702185 \, \Omega$$

Inverter:

$$Z_{inverter} = 0.1804637953 \angle 0.2146032308 \, \Omega$$

Transformer:

$$25 \, \text{kV}/260 \, \text{V} \, (\text{Y}-\Delta)$$

$$Z_{transformer}$$

$$= 70.69350769 \angle 89.94934434 \, \Omega$$

Single Phase High
Impedance

$$30 \, \Omega$$

圖 34 至圖 43 說明在不同的平衡與不平衡故障條件下，母線 1 與 2 的電流正弦波響應。

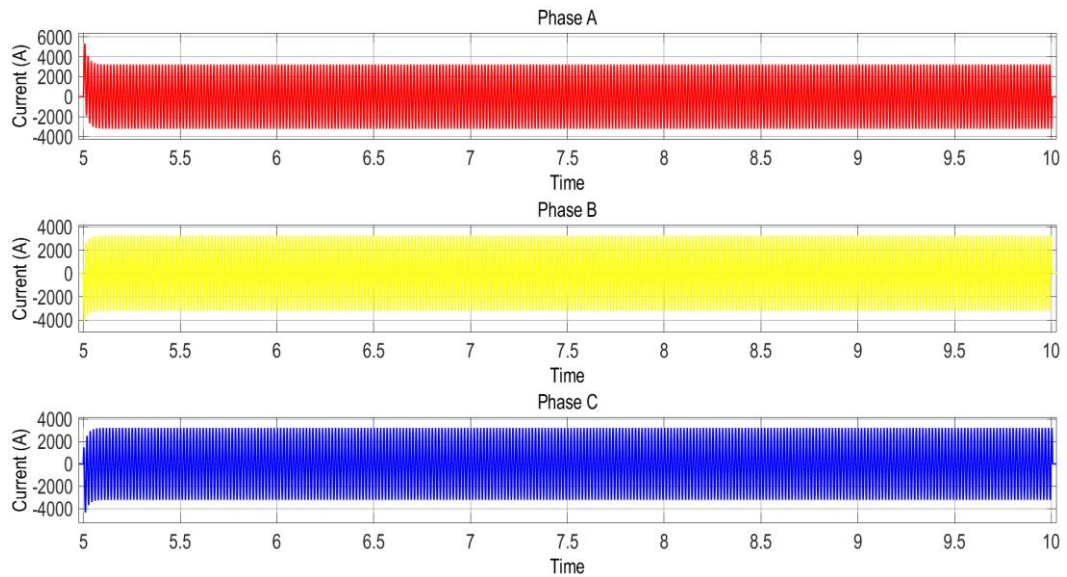


圖 34 母線 1 的三相平衡故障電流

從圖 34 得知當母線 1 發生三相平衡故障時，所有相在故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 週期後逐漸衰減至穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。

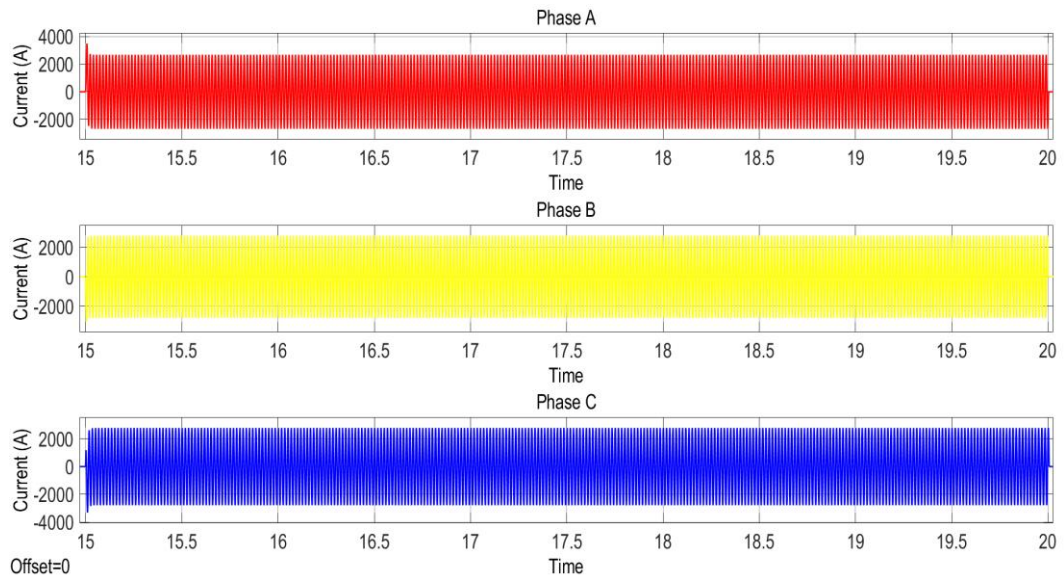


圖 35 母線 2 的三相平衡故障電流

從圖 35 得知，當母線 2 發生三相平衡故障時，所有相在故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。

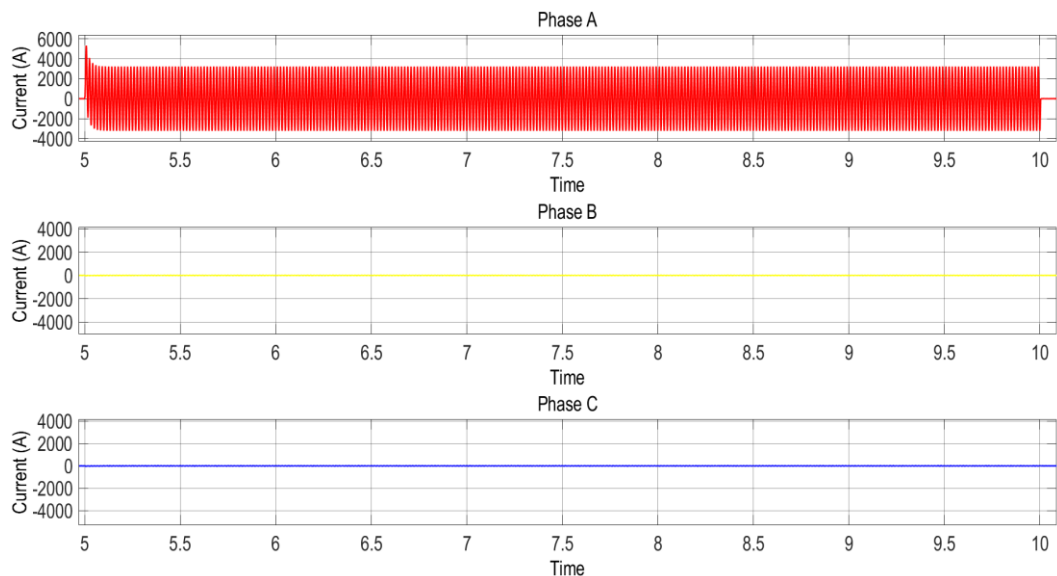


圖 36 母線 1 的單相接地故障電流

從圖 36 得知，當母線 1 在 A 相發生單相接地故障時，A 相故障開始時的電流響應會突然增加，並在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於單相接地故障發生在 A 相，因此 B 相與 C 相不會受到影響。

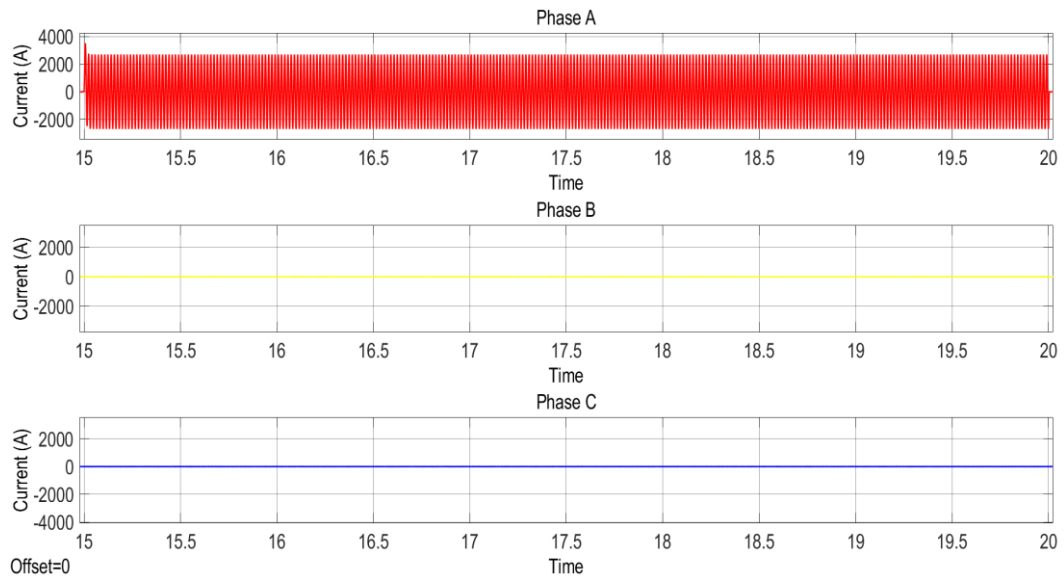


圖 37 母線 2 的單相接地故障電流

從圖 37 得知，當母線 2 在 A 相發生單相接地故障時，A 相故障開始時的電流響應會突然增加，並在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於單相接地故障發生在 A 相，因此 B 相與 C 相不會受到影響。

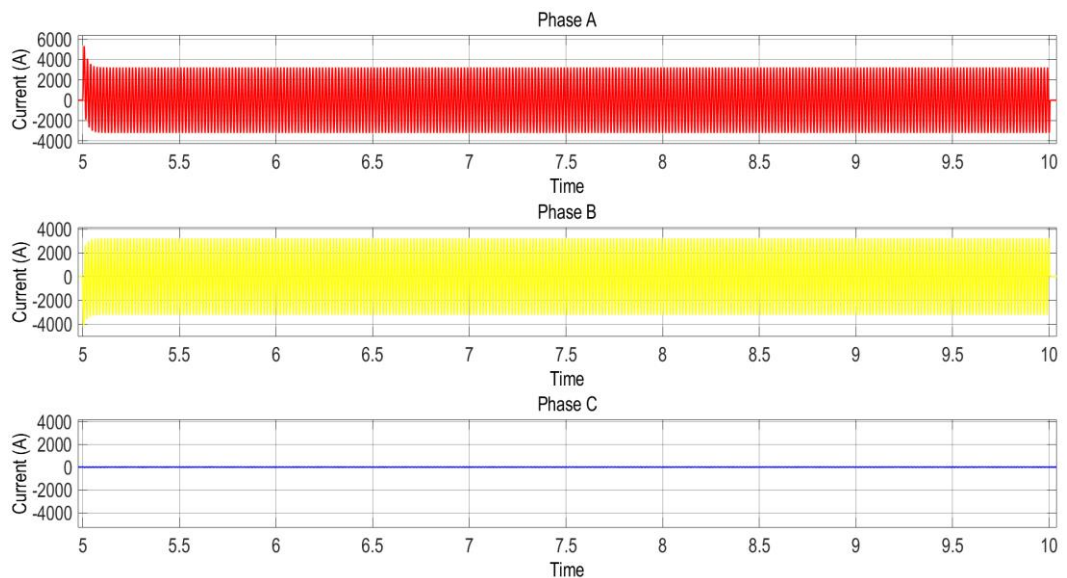


圖 38 母線 1 的雙相接地故障電流

從圖 38 得知，當母線 1 在 A 相與 B 相發生雙相接地故障時，在 A 相與 B 相故障開始時的電流響應會突然增加。電流在 3 個週期後會逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生雙相接地故障，因此 C 相不會受到影響。

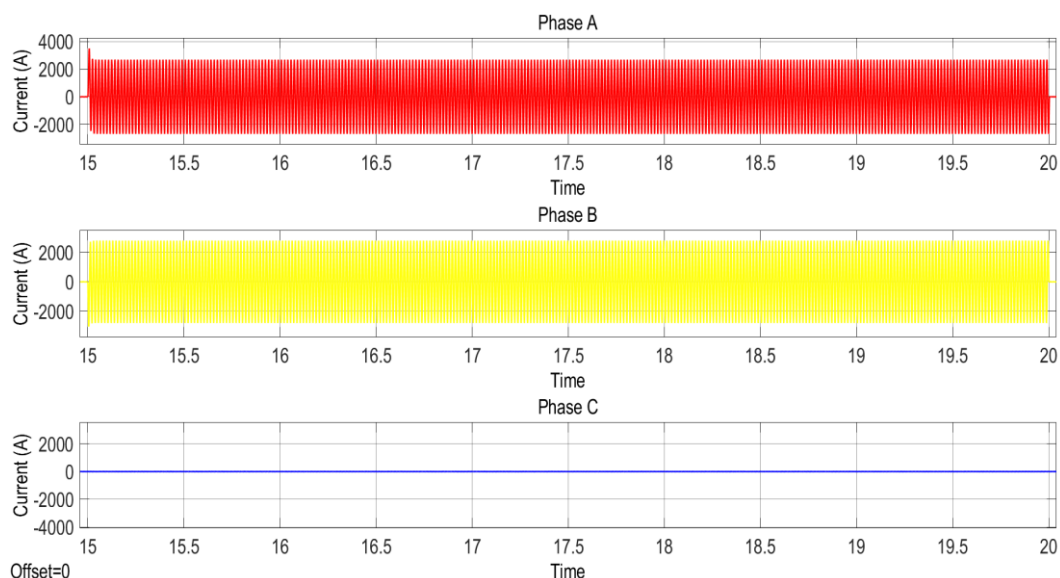


圖 39 母線 2 的雙相接地故障電流

從圖 39 得知，當母線 2 在 A 相與 B 相發生雙相接地故障時，A 相與 B 相故障開始時的電流響應會突然增加。然後電流在 3 個週期後會逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生雙相接地故障，因此 C 相不會受到影響。

從圖 40 得知，當母線 1 在 A 相與 B 相發生相對相故障時，A 相與 B 相故障開始時的電流響應會突然增加。然後電流會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生相對相故障，因此 C 相不會受到影響。

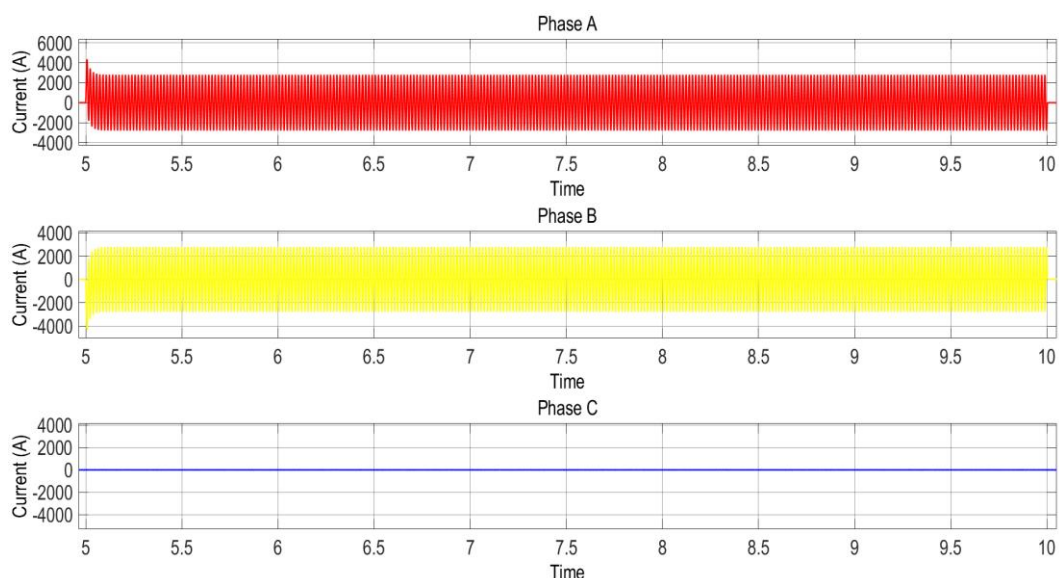


圖 40 母線 1 的相對相故障電流

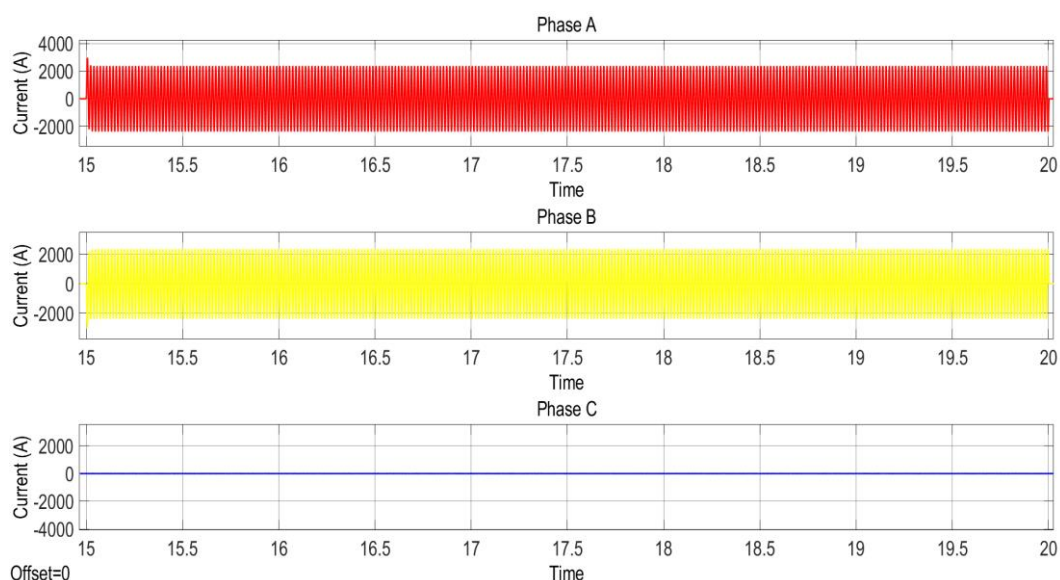


圖 41 母線 2 的相對相故障電流

從圖 41 得知，當母線 2 在 A 相與 B 相發生相對相故障時，A 相與 B 相故障開始時的電流響應會突然增加。然後電流會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生相對相故障，因此 C 相不會受到影響。

單相高阻抗故障的響應與相對地故障的響應相同，如圖 42 與圖 43 所示。單相高阻抗故障的峰值瞬間電流值與穩態故障電流對比相對地故障要低得多。

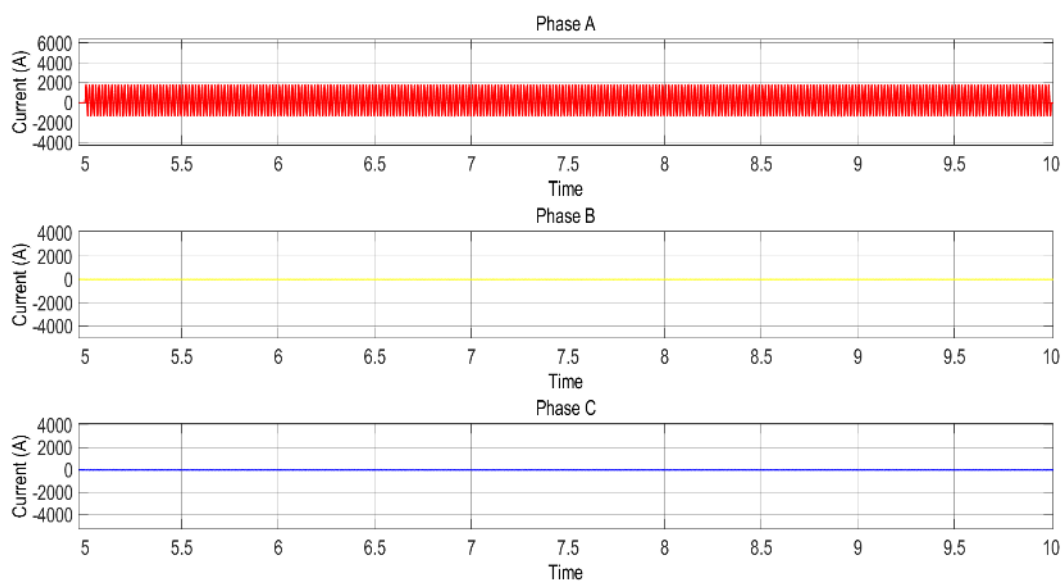


圖 42 母線 1 的單相高阻抗故障電流

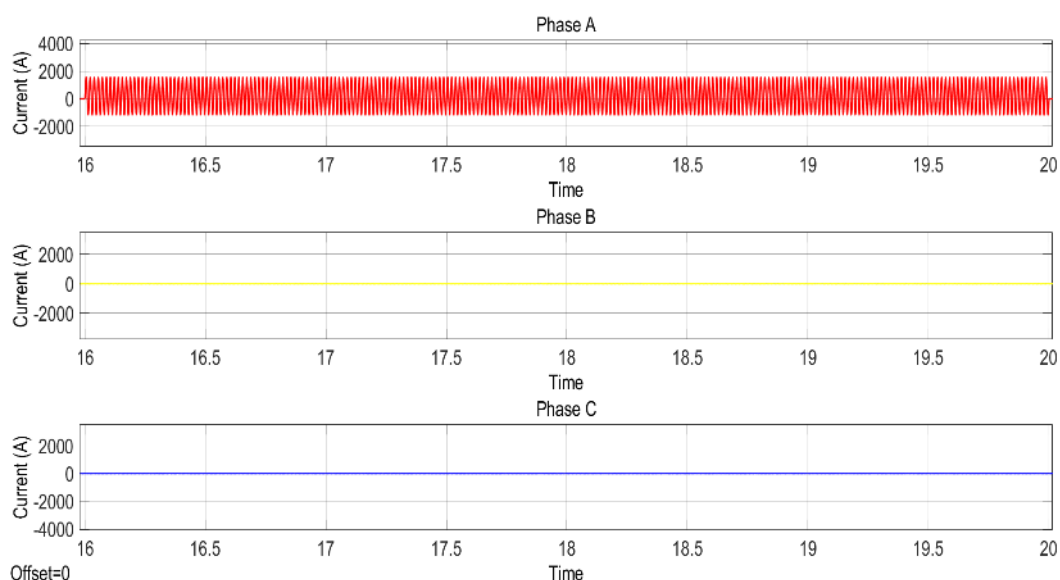


圖 43 母線 2 的單相高阻抗故障電流

二、情境 2

情境 2 說明使用 PQ 控制的 IBDG PV 系統，其 Simulink 模型如圖 44 所示。內建故障模塊用於模擬平衡三相、單相對地、雙相對地與相對相故障，單相高阻抗故障則使用[24]中描述的模式。表 4 比較解析解與 MATLAB Simulink 的模擬結果，分別為母線 1 與母線 2 的峰值瞬間電流值與穩態電流值。

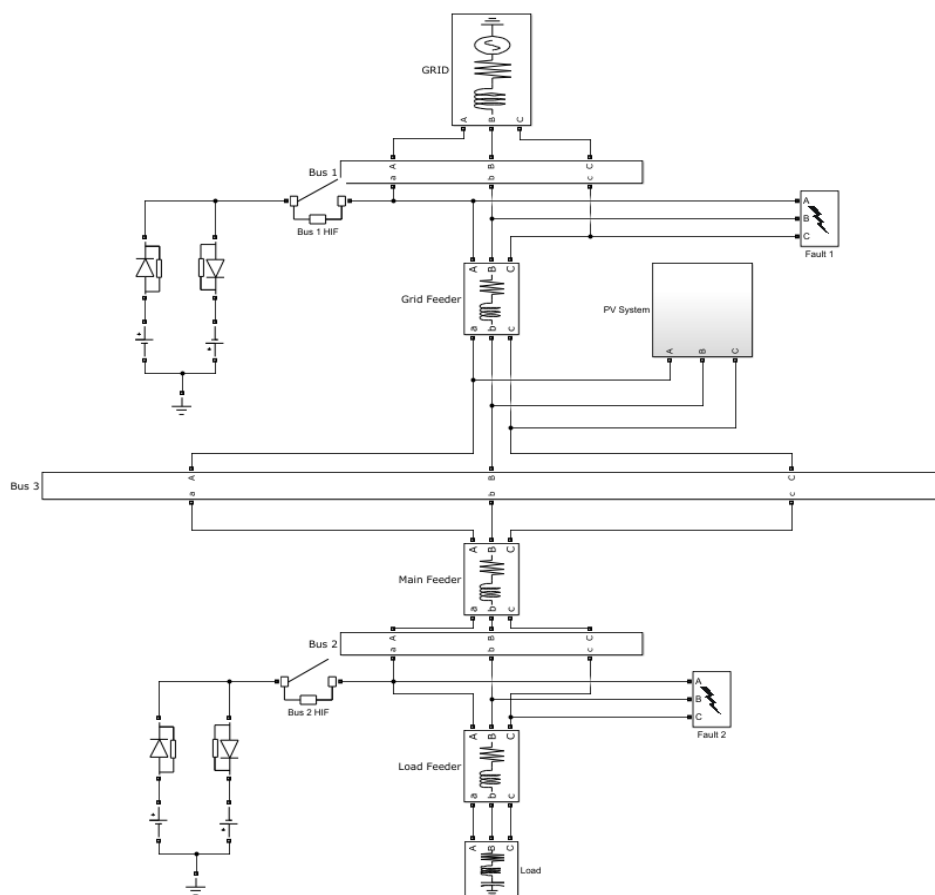


圖 44 IBDG 的 Simulink 模型(具有 PQ 控制的 PV 系統)

表 4 具有 PQ 控制的 IBDG (PV 系統)的 MATLAB 模擬與解析解的比較

故障型式	峰值/穩態	Simulink 解 (Bus 1)	解析解 (Bus 1)	Simulink 解 (Bus 2)	解析解 (Bus 2)
Three - Phase Fault	Peak	5332	5416	3492	4477
	Instantaneous				
Single - line - to - Ground Fault	Steady - State	2281	2309	1887	1909
	Peak				
Double - line - to - Ground Fault	Instantaneous	5332	5102	3514	4659
	Steady - State	2283	2246	1900	1987
Line - to - line Fault	Peak	5332	5127	3501	4381
	Instantaneous				
	Steady - State	2277	2186	1888	1868
	Peak				
	Instantaneous	4359	4691	2955	4290
	Steady - State	1980	2000	1649	1829

Single - Phase High Impedance Fault	Peak Instantaneous Steady - State	1863	2533	1600	2276
		1164	1080	1004	970

如表 4 所示，解析解與 Simulink 模擬的穩態值彼此接近。而峰值瞬間電流值的差異在於式(56)，這是基於[23]的峰值不對稱電流的近似值。用於 PQ 控制的參數如表 5 所示。

表 5 具 PQ 控制的 IBDG(PV 系統)參數

電力系統元件	參數
Utility	25 kV (line voltage) X/R = 7 Sbase = 100 MVA
Grid Feeder	R = 1 Ω L = 1 mH
Main Feeder	R = 1 Ω L = 1 mH
Load Feeder	R = 1 Ω L = 1 mH
Load	25 kV (line voltage) 150 kW
PV System	PV Array: $R_s = 3.039296 \mu\Omega$ $R_f = 0.3849017323 \Omega$ $I_{PV} = 6.9282 A$ Boost Converter: $Z_{converter} = 1.902391516\angle 88.2702185 \Omega$ Inverter: $Z_{inverter} = 0.1804637953\angle 0.2146032308 \Omega$ Transformer: 25 kV/260 V (Y- Δ) $Z_{transformer}$ $= 70.69350769\angle 89.94934434 \Omega$ 30 Ω L = 250 μH $K_p^I = 3 \times 10^{-12}$

圖 45 至圖 54 說明在不同的平衡與不平衡故障條件下，母線 1 與母線 2 的電流正弦波響應。

從圖 45 得知，當母線 1 發生三相平衡故障時，所有相的電流響應在故障開始時會突然增加，並在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。

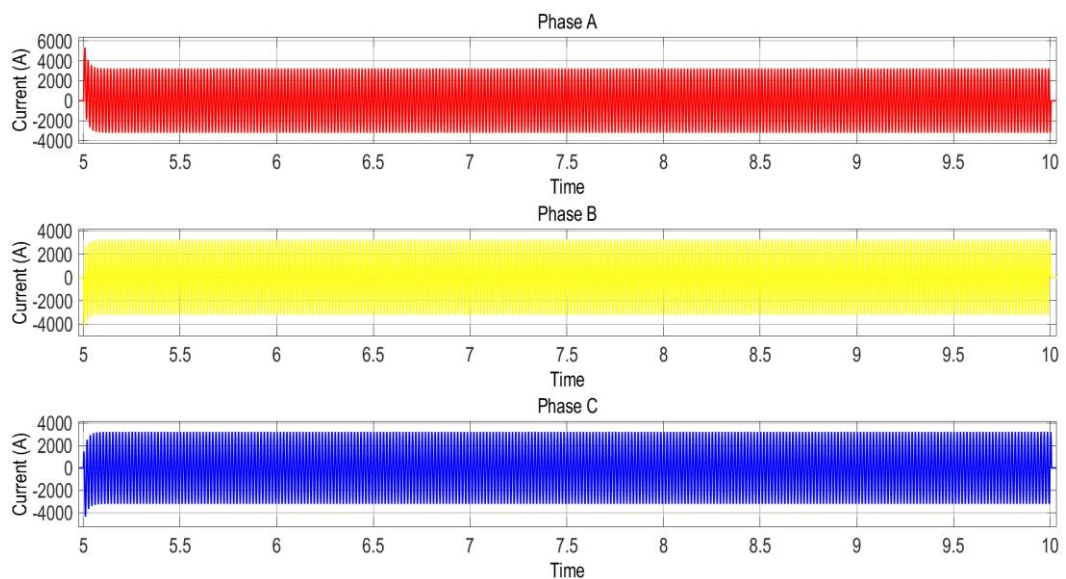


圖 45 母線 1 的三相平衡故障電流

從圖 46 得知，當母線 2 發生三相平衡故障時，所有相的電流響應在故障開始時突然增加，並在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。

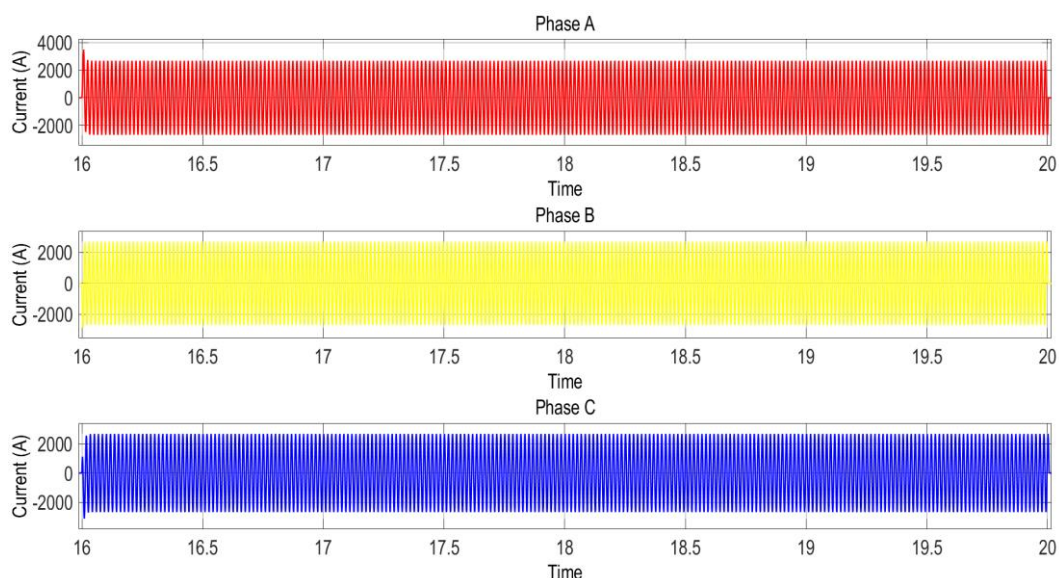


圖 46 母線 2 上的三相平衡故障電流

從圖 47 得知，當母線 1 在 A 相發生單相接地故障時，A 相故障開始時的電流響應會突然增加，並在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於單相接地故障發生在 A 相，因此 B 相和 C 相不會受到影響。

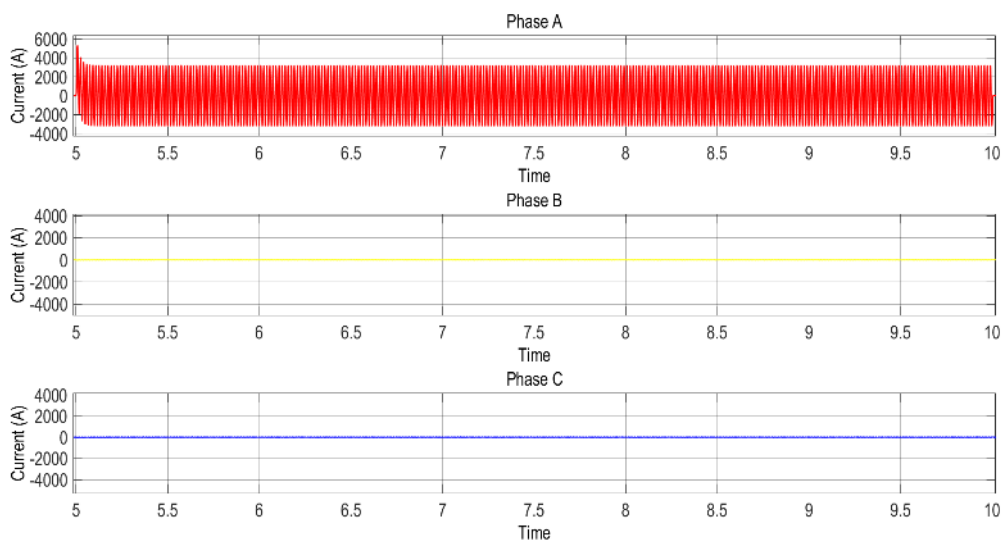


圖 47 母線 1 單相接地故障電流

從圖 48 得知，當母線 2 在 A 相發生單相接地故障時，A 相故障開始時的電流響應會突然增加，並在 3 個週期後逐漸衰減到至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於單相接地故障發生在 A 相，因此 B 相和 C 相不會受到影響。

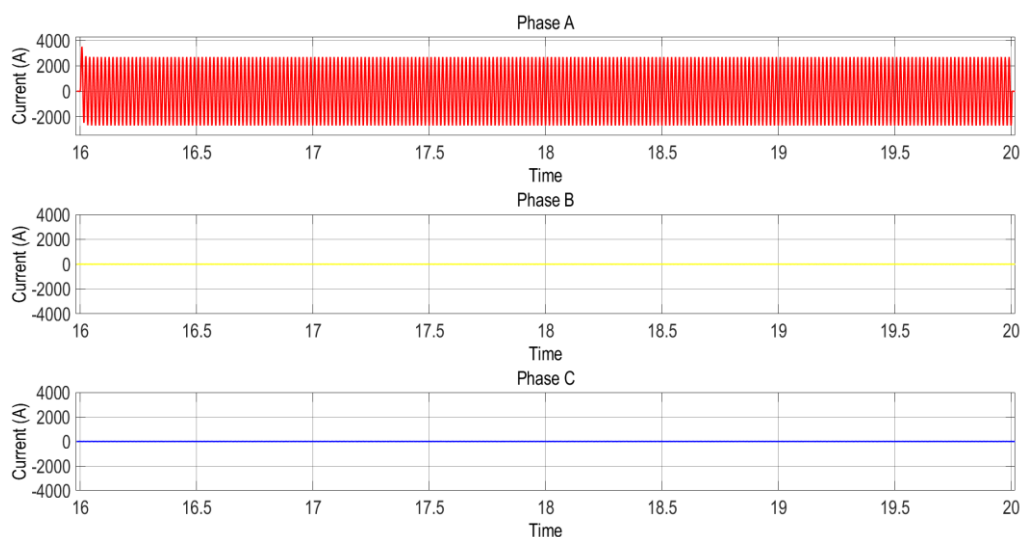


圖 48 母線 2 的單相接地故障電流

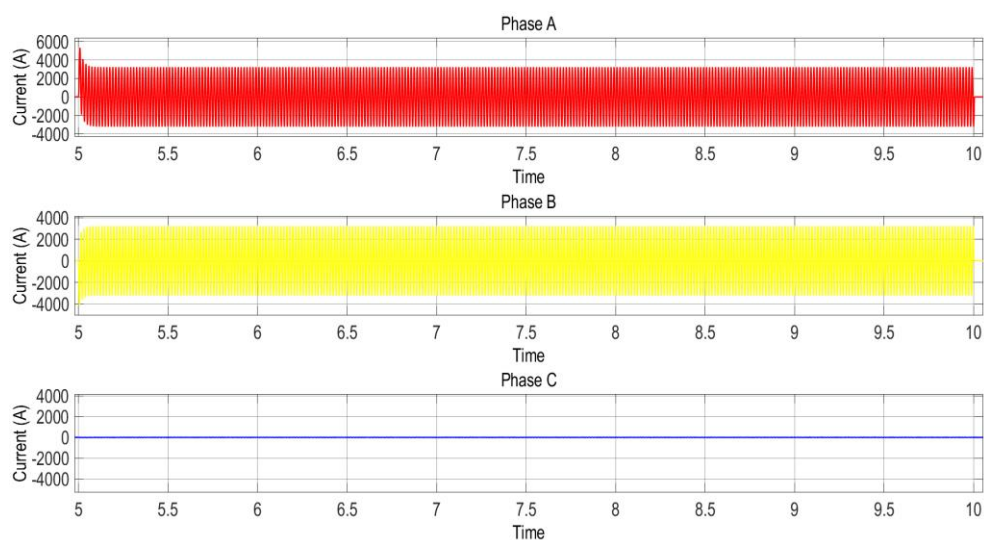


圖 49 母線 1 的雙相接地故障電流

從圖 49 得知，當母線 1 在 A 相與 B 相發生雙相接地故障時，在 A 相與 B 相故障開始時電流響應會突然增加，並在 3 個週期後逐漸衰減到至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生雙相接地故障，因此 C 相不會受到影響。

從圖 50 得知，當母線 2 在 A 相與 B 相發生雙相接地故障時，A 相與 B 相故障開始時的電流響應會突然增加，並在 3 個週期後逐漸衰減到至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生雙相接地故障，因此 C 相不會受到影響。

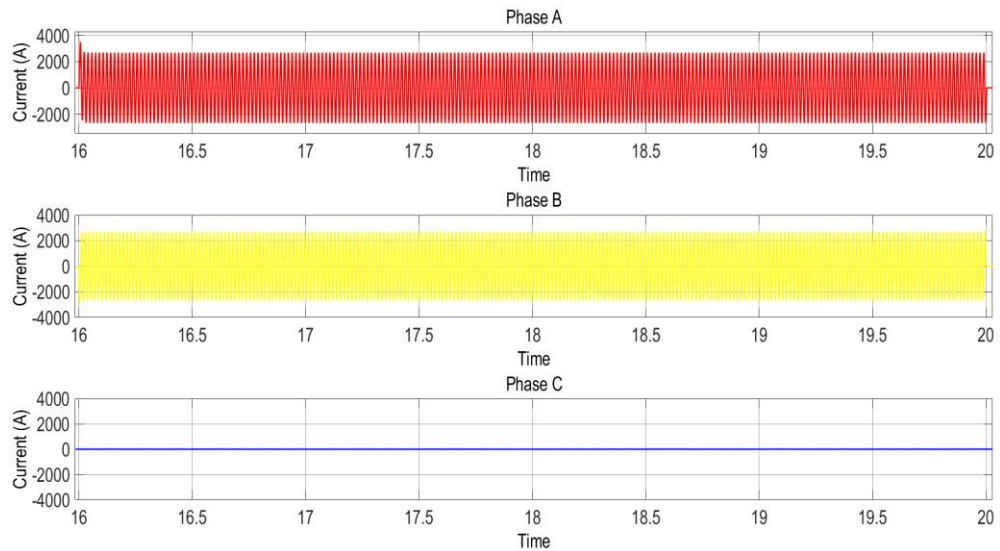


圖 50 母線 2 的雙相接地故障電流

從圖 51 得知，當母線 1 在 A 相和 B 相發生相對相故障時，A 相和 B 相開始故障時的電流響應會突然增加，並在 3 個週期後逐漸衰減到至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於 A 相和 B 相發生線對線故障，因此 C 相不會受到影響。

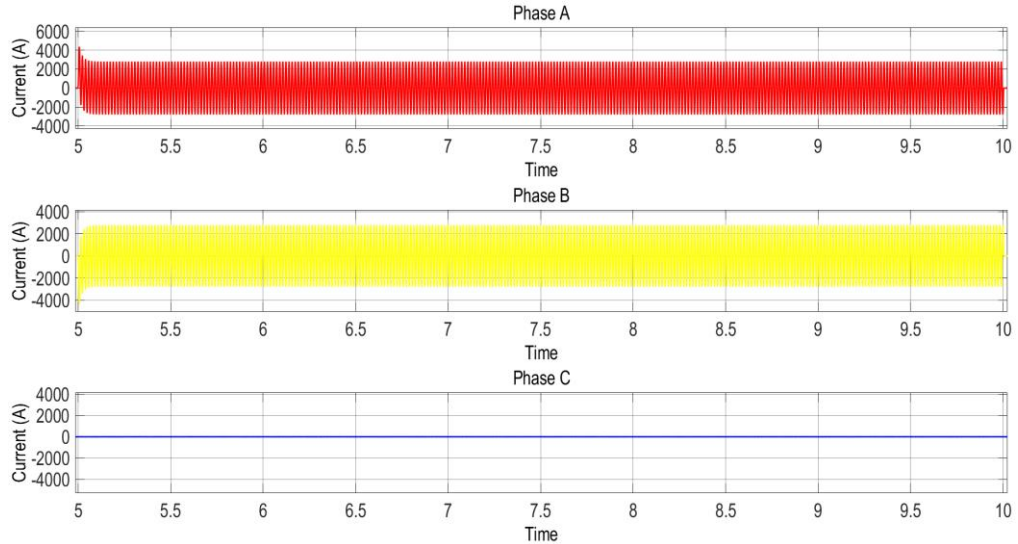


圖 51 母線 1 的相對相故障電流

從圖 52 得知，當母線 2 在 A 相和 B 相發生相對相故障時，A 相與 B 相故障開始時的電流響應會突然增加，並在 3 個週期後逐漸衰減到至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 左右結束。由於 A 相與 B 相發生線對線故障，因此 C 相不會受到影響。

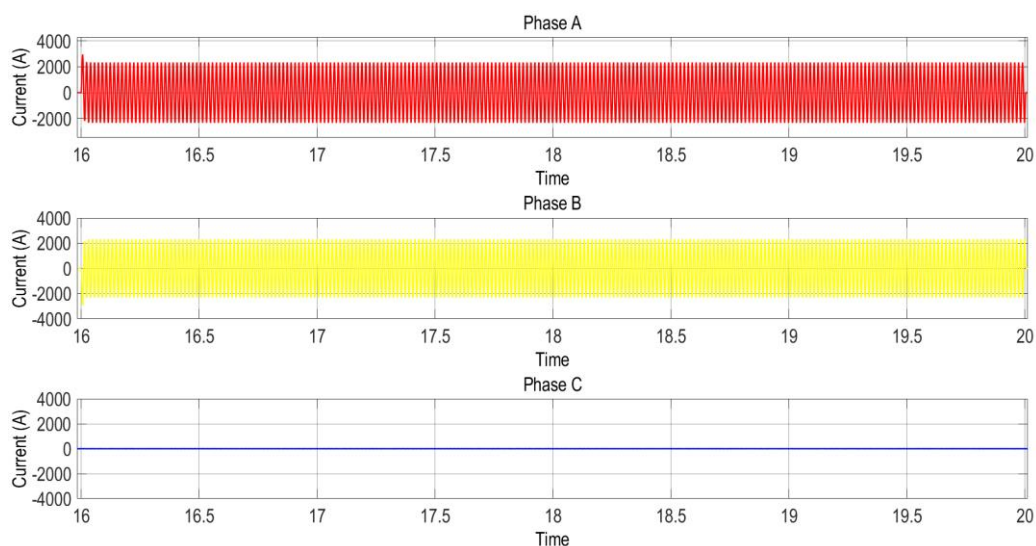


圖 52 母線 2 的相對相故障電流

單相高阻抗故障的響應與線對地故障的響應相同，如圖 53 和圖 54 所示。單相高阻抗故障由於連接高阻抗，其峰值瞬間電流值與穩態故障電流，相較相對地故障低很多。

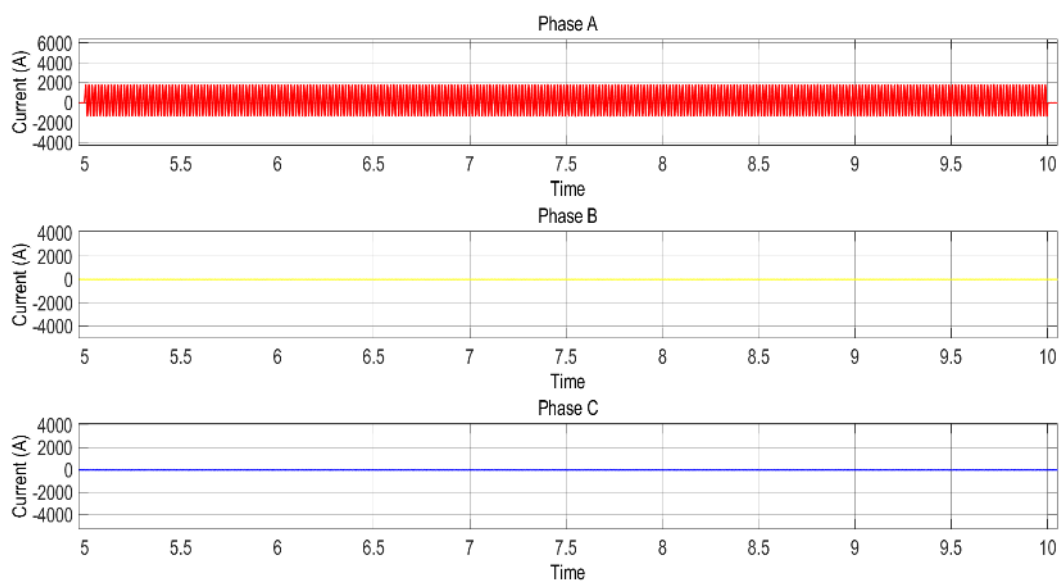


圖 53 母線 1 的單相高阻抗故障電流

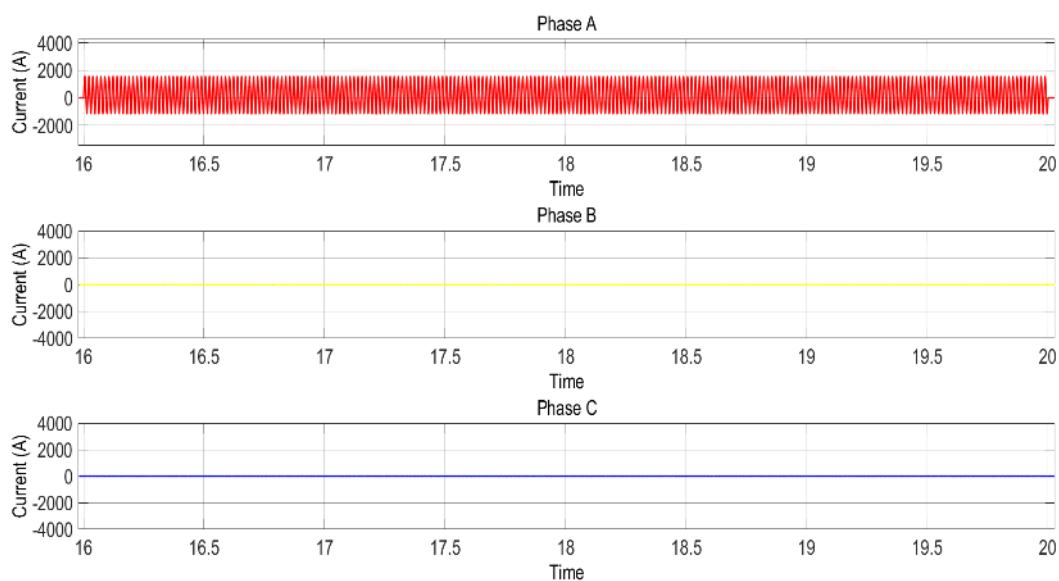


圖 54 母線 2 的單相高阻抗故障電流

三、情境 3

情境 3 說明使用 VQ 控制的 IBDG PV 系統，其 Simulink 模型如圖 55 所示，內建故障模塊用於模擬平衡三相、單相對地、雙相對地與相對相故障，單相高阻抗故障則使用[24]中描述的模式。表 6 比較解析解與 MATLAB Simulink 的模擬結果，分別是母線 1 與母線 2 的峰值瞬間電流值與穩態電流值。

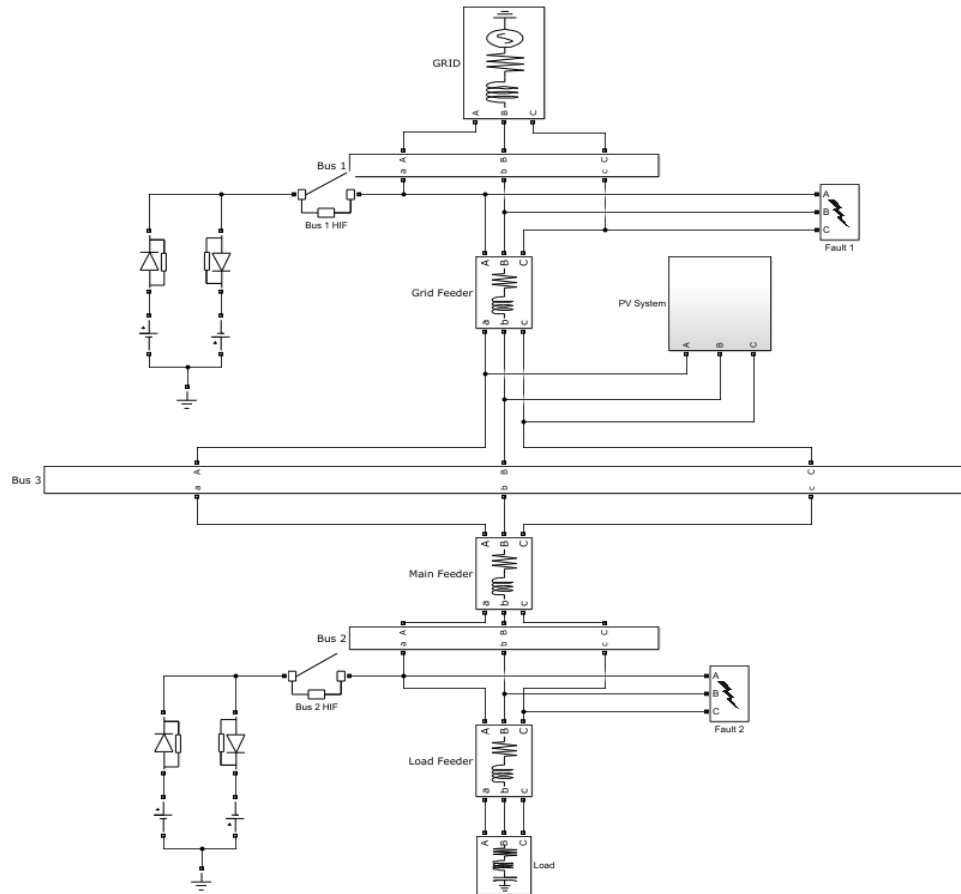


圖 55 IBDG 的 Simulink 模型(具有 VQ 控制的 PV 系統)

表 6 使用 VQ 控制的 IBDG(PV 系統)其 MATLAB 模擬與解析解的比較

故障型式	峰值/穩態	Simulink 解 (Bus 1)	解析解 (Bus 1)	Simulink 解 (Bus 2)	解析解 (Bus 2)
Three - Phase Fault	Peak	5332	5416	3857	4476
	Instantaneous				
Single - line - to - Ground Fault	Steady - State	2285	2309	1982	1909
	Peak				
Double - line - to - Ground Fault	Instantaneous	5332	5267	3840	4354
	Steady - State	2277	2246	1993	1856
Line - to -	Peak	5332	5127	3826	4239
	Instantaneous				
Line - to -	Steady - State	2280	2186	1979	1807
	Peak				
Line - to -	Instantaneous	4359	4691	2909	3876
	Steady - State				

line Fault	Steady - State	1977	2000	1639	1653
Single - Phase	Peak Instantaneous	1863	2533	1600	2164
High Impedance Fault	Steady - State	1161	1080	1002	923

如表 6 所示，解析解與 Simulink 模擬的穩態值接近。另外，峰值瞬間電流值的差異是在於式(56)，這是基於[23]的峰值不對稱電流的近似值。VQ 控制的參數如表 7 所示。

表 7 使用 VQ 控制的 IBDG (PV 系統)參數

電力系統元件	參數
Utility	25 kV (line voltage) X/R = 7 Sbase = 100 MVA
Grid Feeder	R = 1 Ω L = 1 mH
Main Feeder	R = 1 Ω L = 1 mH
Load Feeder	R = 1 Ω L = 1 mH
Load	25 kV (line voltage) 150 kW
PV System	PV Array:
	$R_s = 3.039296 \mu\Omega$
	$R_f = 0.3849017323 \Omega$
	$I_{PV} = 6.9282 A$
	Boost Converter:
	$Z_{converter} = 1.902391516\angle 88.2702185 \Omega$
	Inverter:
Single Phase High Impedance	$Z_{inverter} = 0.1804637953\angle 0.2146032308 \Omega$
	Transformer:
	25 kV/260 V (Y- Δ)
	$Z_{transformer}$ $= 70.69350769\angle 89.94934434 \Omega$
	30 Ω

圖 56 至圖 65 分別說明在不同的平衡與不平衡故障條件下，母線 1 與母線 2 的電流正弦波響應。

從圖 56 得知，當母線 1 發生三相平衡故障時，所有相於故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。

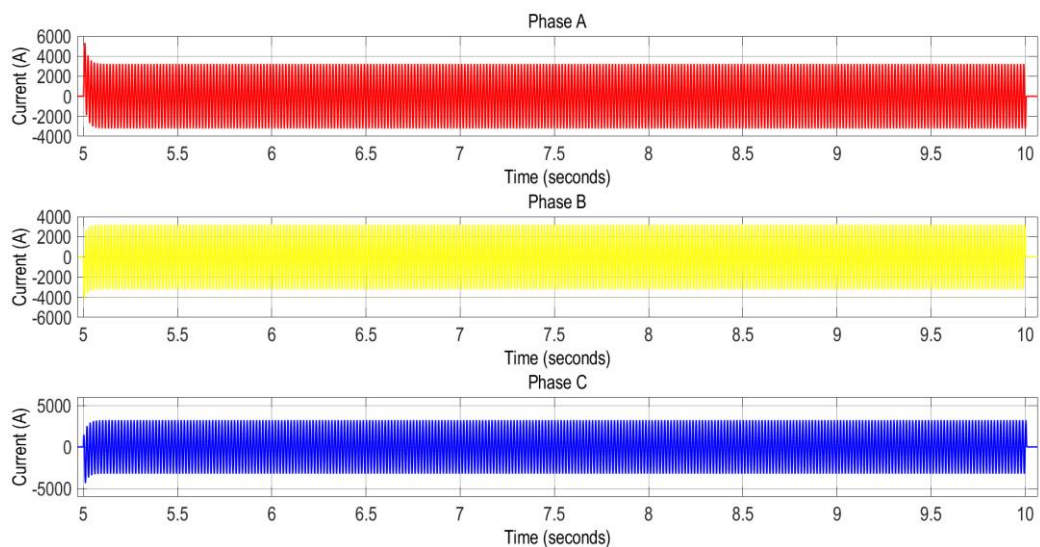


圖 56 母線 1 的三相平衡故障電流

從圖 57 得知，當母線 2 發生三相平衡故障時，所有相在故障開始時的電流響應會突然增加，並且會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。

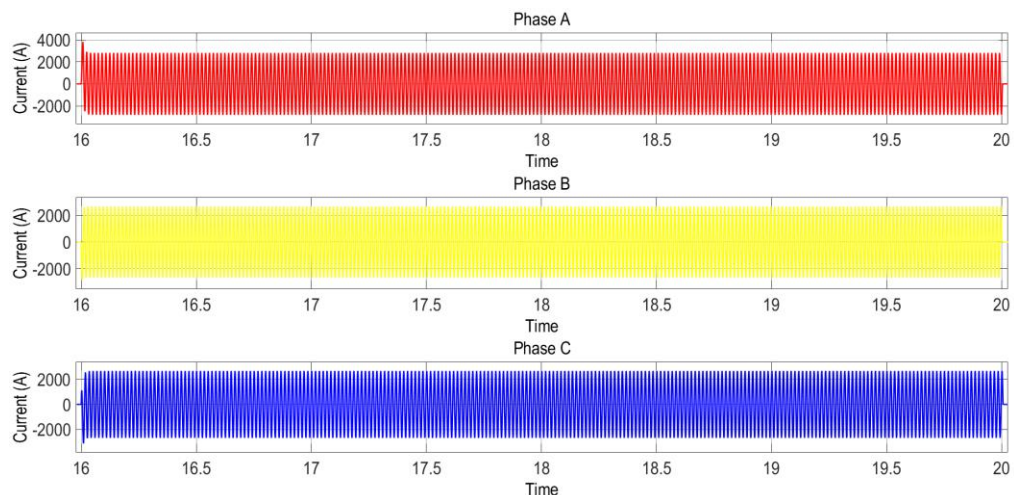


圖 57 母線 2 的三相平衡故障電流

從圖 58 得知，當母線 1 在 A 相發生單相接地故障時，A 相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減到至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於單相接地故障發生在 A 相，因此 B 相與 C 相不會受到影響。

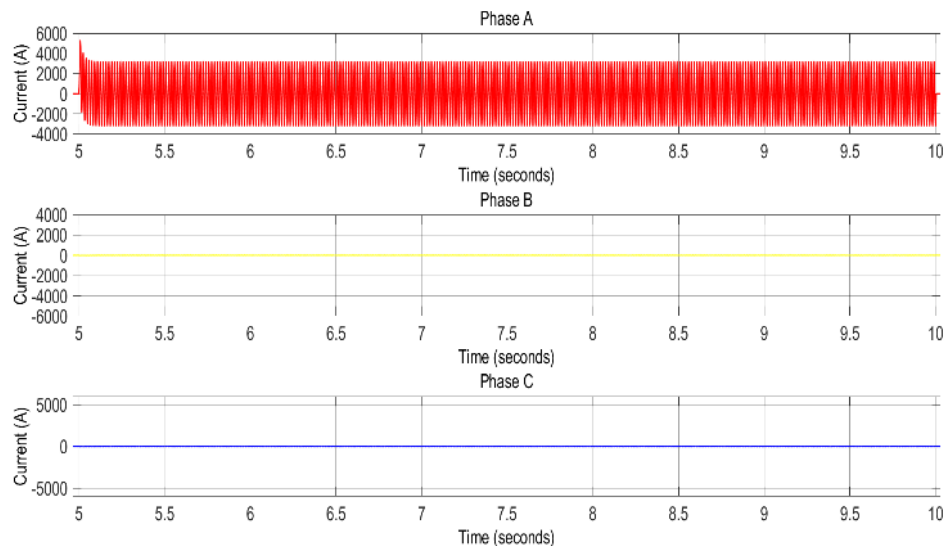


圖 58 母線 1 的單相接地故障電流

從圖 59 得知，當母線 2 在 A 相發生單相接地故障時，A 相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於單相接地故障發生在 A 相，因此 B 相與 C 相不會受到影響。

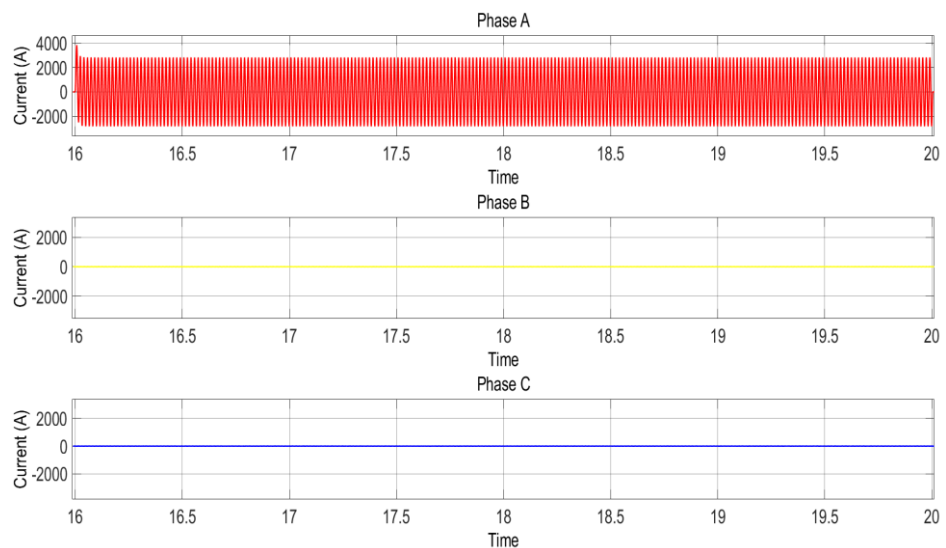


圖 59 母線 2 的單相接地故障電流

從圖 60 得知，當母線 1 在 A 相與 B 相發生雙相接地故障時，A 相與 B 相故障開始時的電流響應會突然增加。並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生雙線接地故障，因此 C 相不會受到影響。

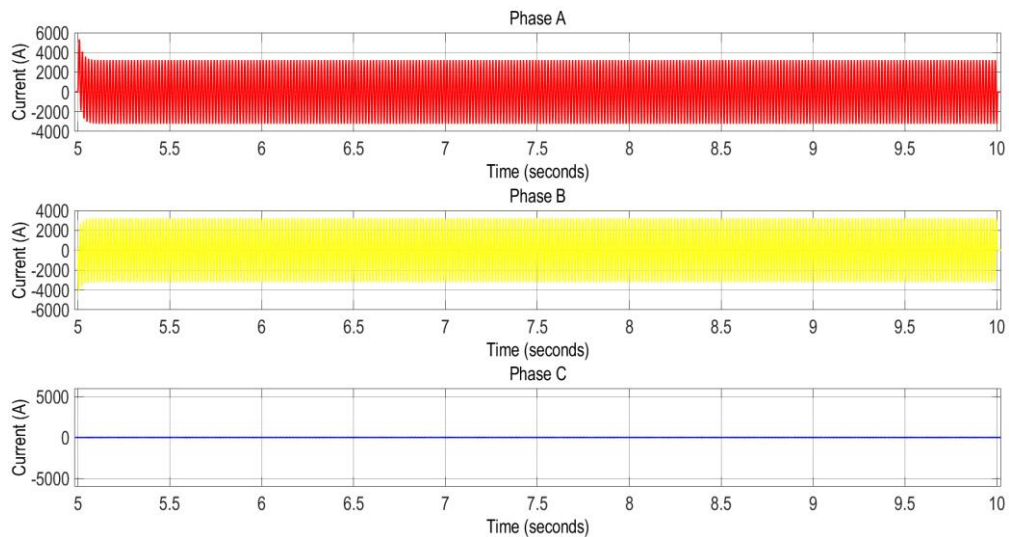


圖 60 母線 1 的雙相接地故障電流

從圖 61 得知，當母線 2 在 A 相與 B 相發生雙相接地故障時，A 相與 B 相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生雙線接地故障，因此 C 相不會受到影響。

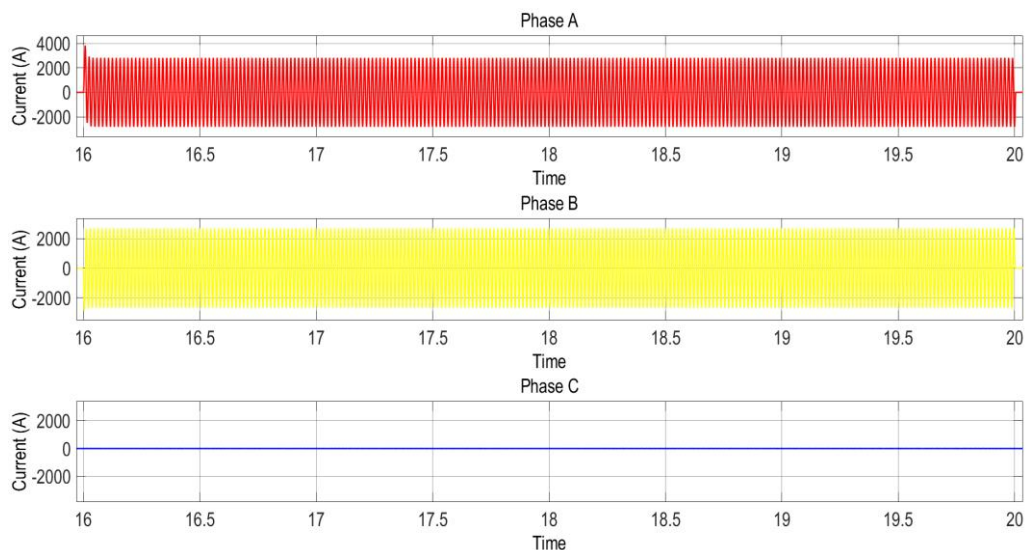


圖 61 母線 2 的雙相接地故障電流

從圖 62 得知，當母線 1 在 A 相與 B 相發生相對相故障時，A 相與 B 相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生線對線故障，因此 C 相不會受到影響。

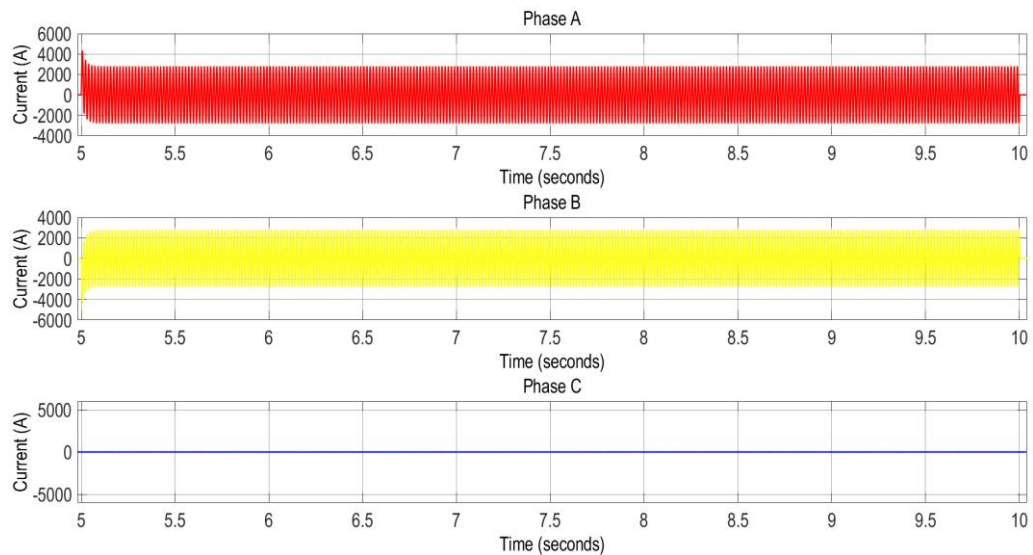


圖 62 母線 1 的線對線故障電流

從圖 63 得知，當母線 2 在 A 相與 B 相發生相對相故障時，A 相與 B 相故障開始時電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生線對線故障，因此 C 相不會受到影響。

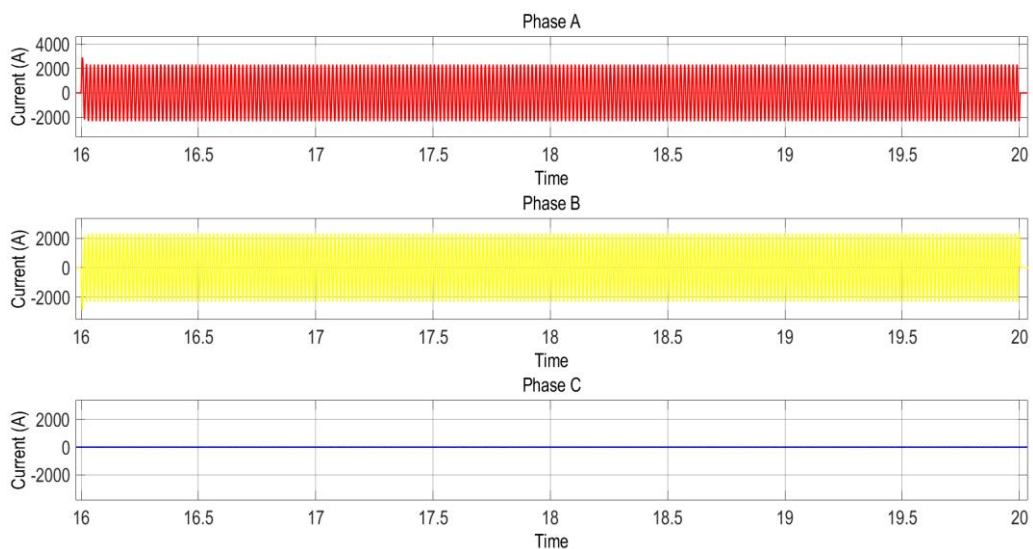


圖 63 母線 2 的相對相故障電流

單相高阻抗故障的響應與相對地故障的響應相同，如圖 64 與圖 65 所示。單相高阻抗故障由於連接高阻抗，其峰值瞬間電流值與穩態故障電流相較相對地故障低很多。

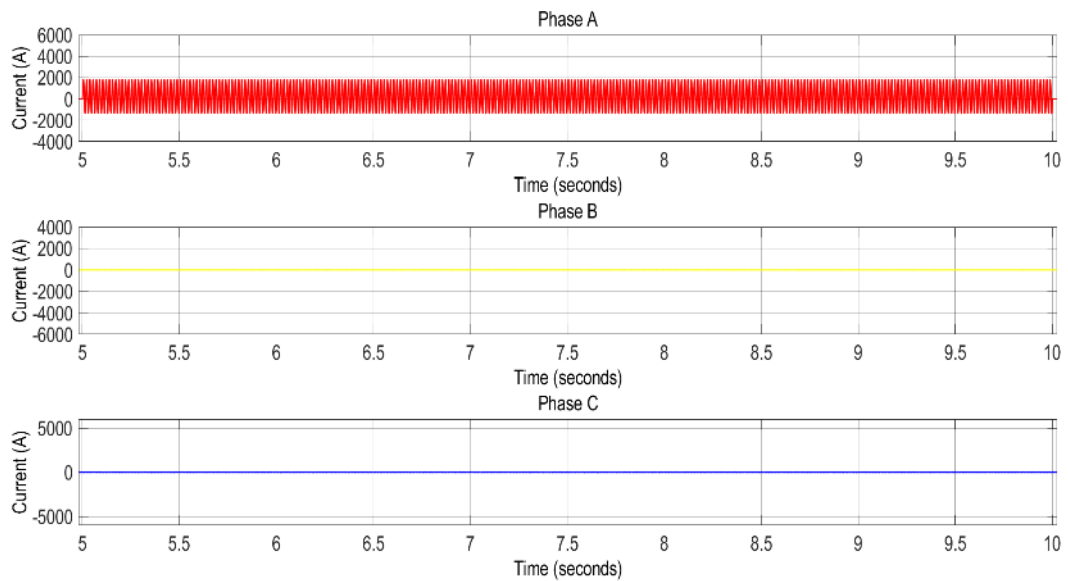


圖 64 母線 1 的單相高阻抗故障電流

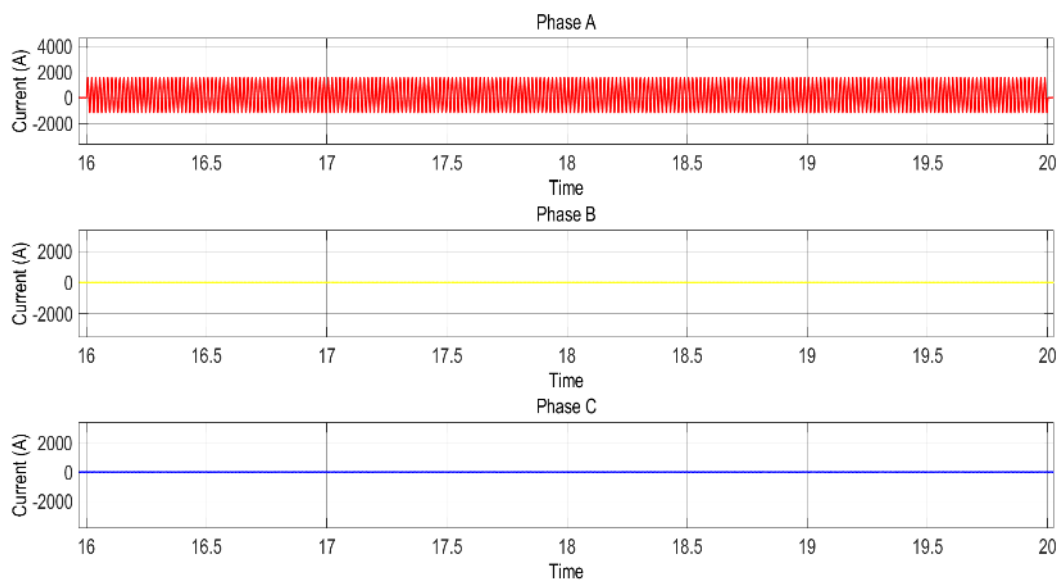


圖 65 母線 2 的單相高阻抗故障電流

四、情境 4

情境 4 用以說明 BESS 系統使用 PQ 控制的模擬情境，其 Simulink 模型如圖 66 所示。內建故障模塊用於模擬平衡三相、單相對地、雙相對地與相對相故障，而對於單相高阻抗故障則使用[24]中描述的模型。表 8 比較解析解與 MATLAB Simulink 的模擬結果，分別是母線 1 與母線 2 的峰值瞬間電流值與穩態電流值。

如表 8 所示，解析解與 Simulink 模擬的穩態值接近。另外，峰值瞬間電流值的差異在於式(56)，這是基於[23]的峰值不對稱電流的近似值。PQ 控制的參數如表 9 所示。

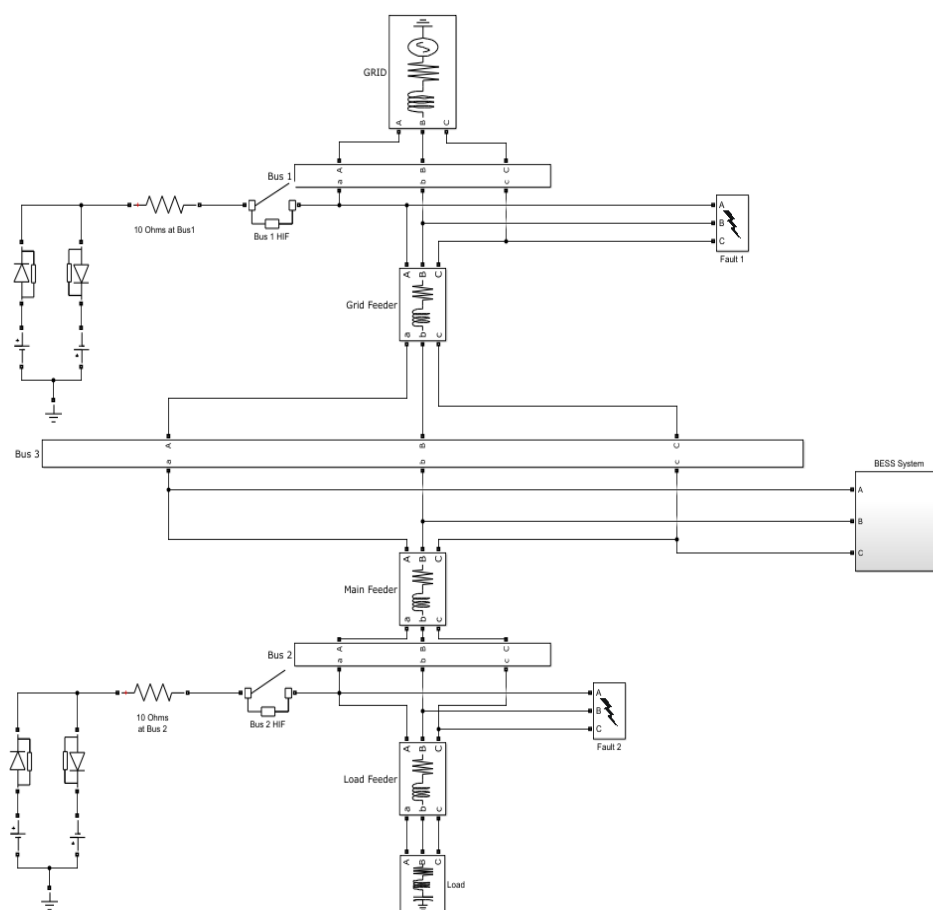


圖 66 具有 PQ 控制的 BESS 系統的 Simulink 模型

表 8 使用 PQ 控制的 BESS 系統其 MATLAB 模擬與解析解的比較

故障型式	峰值/穩態	Simulink 解 (Bus 1)	解析解 (Bus 1)	Simulink 解 (Bus 2)	解析解 (Bus 2)
Three - Phase Fault	Peak	3472	3416	2689	3423
	Instantaneous				
	Steady - State	3233	3309	2542	2627
Single - line - to - Ground Fault	Peak	1245	1105	969	1078
	Instantaneous				
	Steady - State	1084	1050	858	900
Double - line - to - Ground Fault	Peak	2367	2139	1830	1997
	Instantaneous				
	Steady - State	2162	2053	1709	1694
Line - to - line Fault	Peak	1824	1997	1412	1781
	Instantaneous				
	Steady - State	1675	1617	1283	1365
Single - Phase High Impedance Fault	Peak	552	604	473	566
	Instantaneous				
	Steady - State	546	530	468	430

表 9 使用 PQ 控制的 BESS 系統參數

電力系統元件	參數
Utility	25 kV (line voltage)
	X/R = 7
	Sbase = 100 MVA
Grid Feeder	R = 1 Ω
	L = 1 mH
Main Feeder	R = 1 Ω
	L = 1 mH
Load Feeder	R = 1 Ω
	L = 1 mH
Load	25 kV (line voltage)
	150 kW
BESS System	BESS:
	$R_s = 0.009 \Omega$
	$I_{BESS} = 6.9282 A$
	Boost Converter:
	$Z_{converter} = 1.902391516 \angle 88.2702185 \Omega$
	Inverter:
	$Z_{inverter} = 0.1804637953 \angle 0.2146032308 \Omega$

	Transformer:
	25 kV/260 V (Y- Δ)
	$Z_{transformer}$
	= 70.69350769 $\angle$ 89.94934434 Ω
Single Phase High	
Impedance	30 Ω
PQ Control Parameters	L = 250 μ H
	$K_p^I = 3 \times 10^{-12}$

圖 67 至圖 76 分別說明在不同的平衡和不平衡故障條件下，母線 1 與母線 2 的電流正弦波響應。

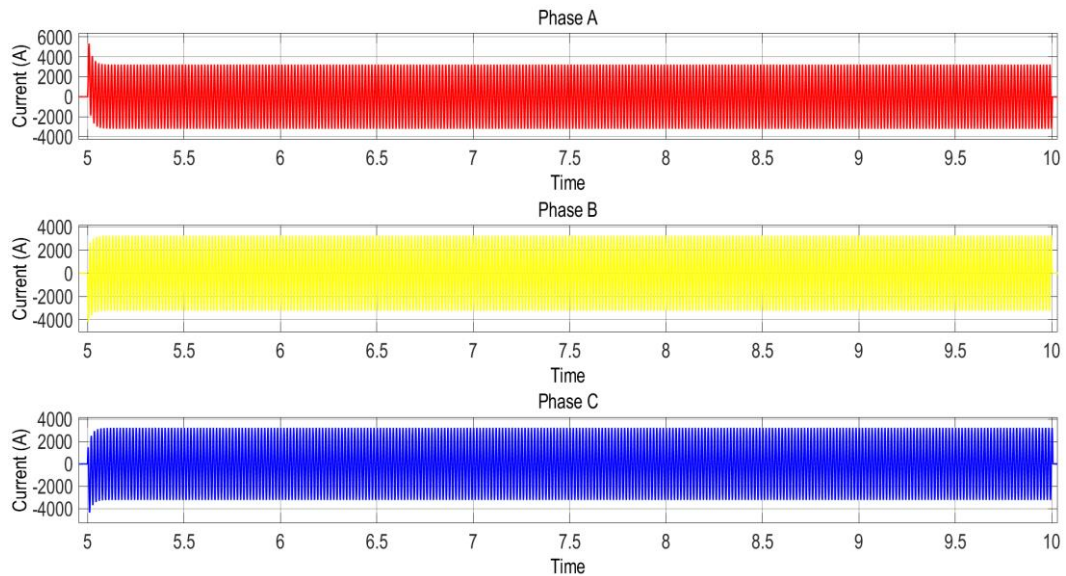


圖 67 母線 1 的三相平衡故障電流

從圖 67 得知，當母線 1 發生三相平衡故障時，所有相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。

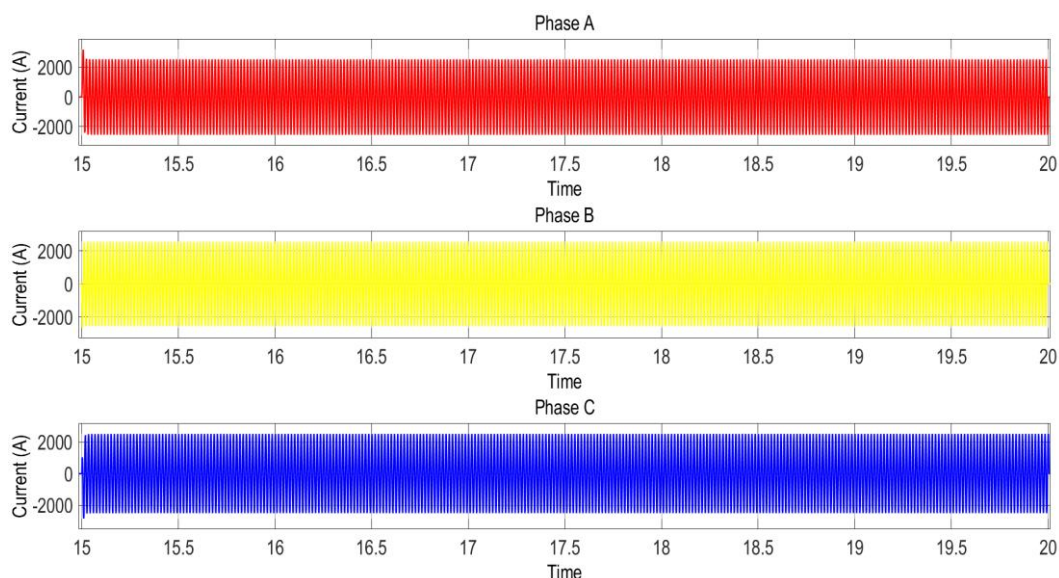


圖 68 母線 2 的三相平衡故障電流

從圖 68 得知，當母線 2 發生三相平衡故障時，所有相在故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。

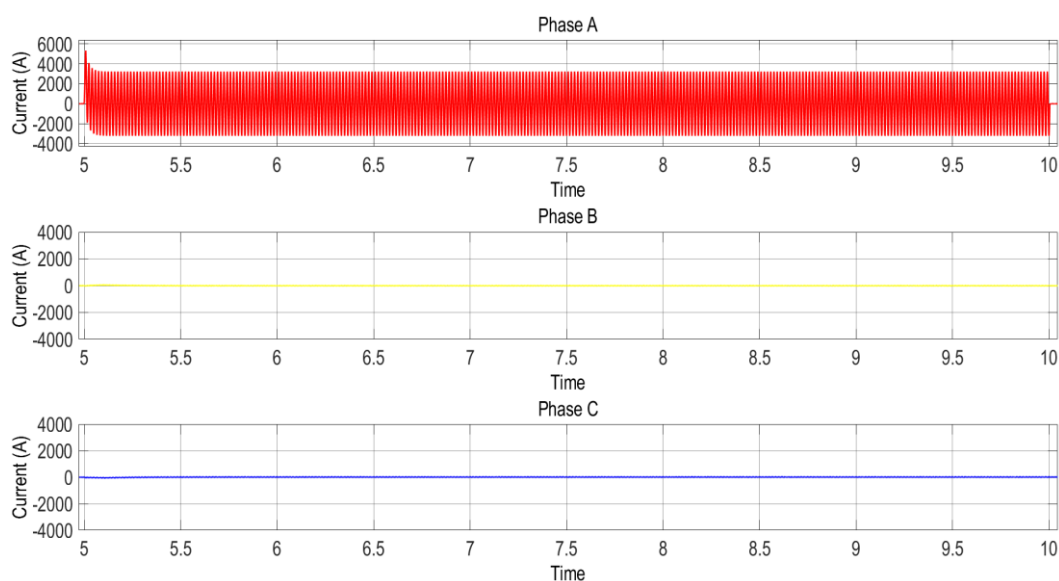


圖 69 母線 1 的單相接地故障電流

從圖 69 得知，當母線 1 在 A 相發生單相對地故障時，A 相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於單線對地故障發生在 A 相，因此 B 相與 C 相不會受到影響。

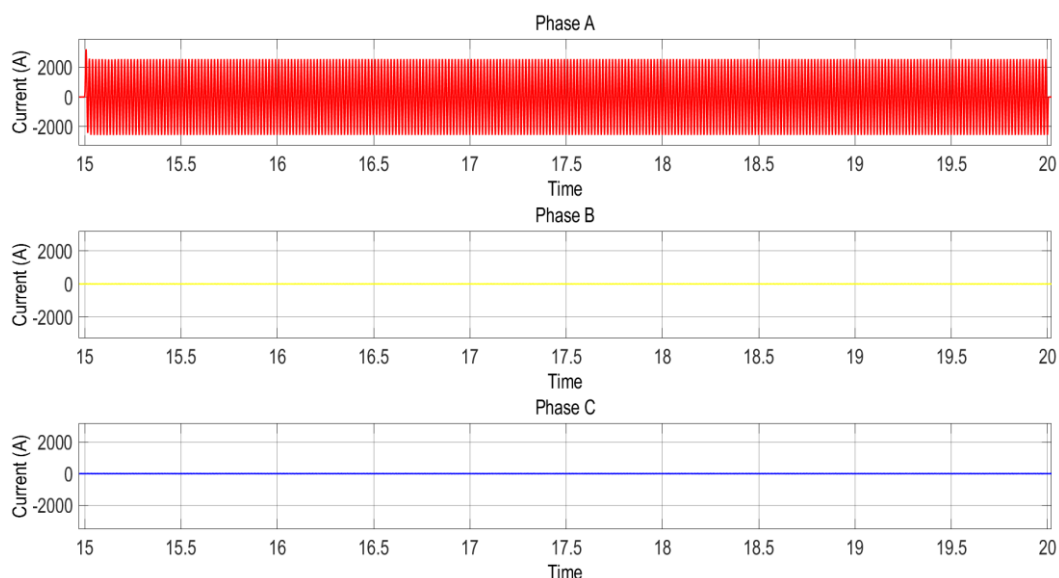


圖 70 母線 2 的單相接地故障電流

從圖 70 得知，當母線 2 在 A 相發生單相接地故障時，A 相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於單相接地故障發生在 A 相，因此 B 相與 C 相不會受到影響。

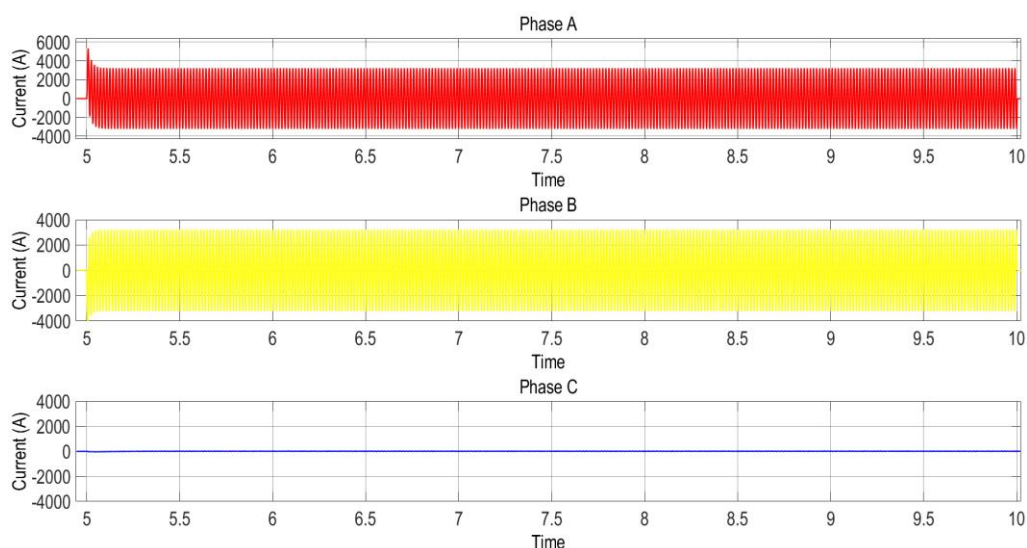


圖 71 母線 1 的雙線接地故障電流

從圖 71 得知，當母線 1 在 A 相與 B 相發生雙相接地故障時，A 相與 B 相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生雙線接地故障，因此 C 相不會受到影響。

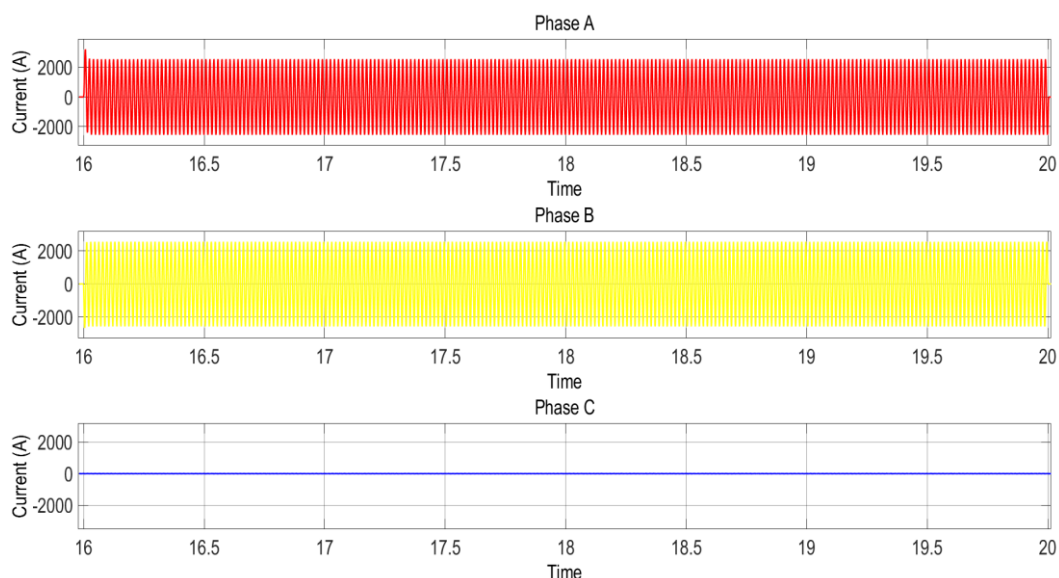


圖 72 母線 2 的雙相接地故障電流

從圖 72 得知，當母線 2 在 A 相與 B 相發生雙相接地故障時，A 相與 B 相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生雙相接地故障，因此 C 相不會受到影響。

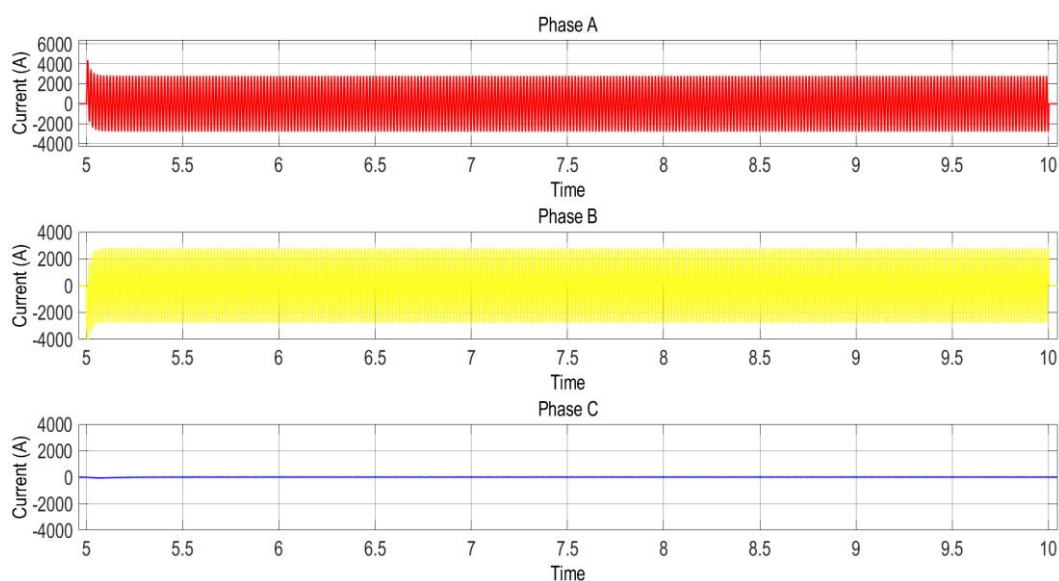


圖 73 母線 1 的相對相故障電流

從圖 73 得知，當母線 1 在 A 相與 B 相發生相對相故障時，A 相與 B 相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生相對相故障，因此 C 相不會受到影響。

從圖 74 得知，當母線 2 在 A 相與 B 相發生相對相故障時，A 相與 B 相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生相對相故障，因此 C 相不會受到影響。

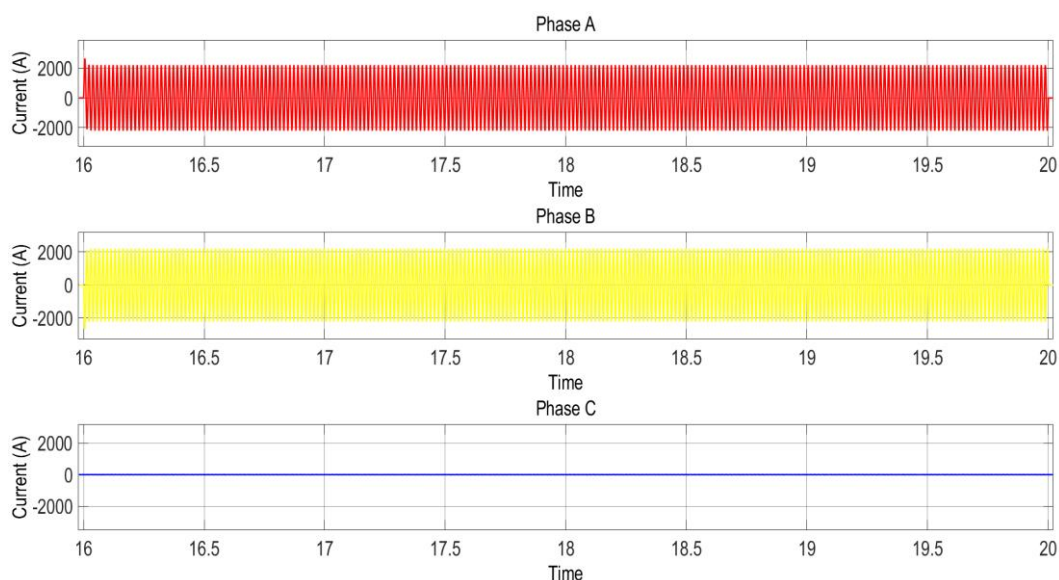


圖 74 母線 2 的相對相故障電流

單相高阻抗故障的響應與單相接地故障的響應相同，如圖 75 與圖 76 所示。不同處在於單相高阻抗故障由於連接高阻抗，其峰值瞬間電流值與穩態故障電流，相較相對地故障低很多。

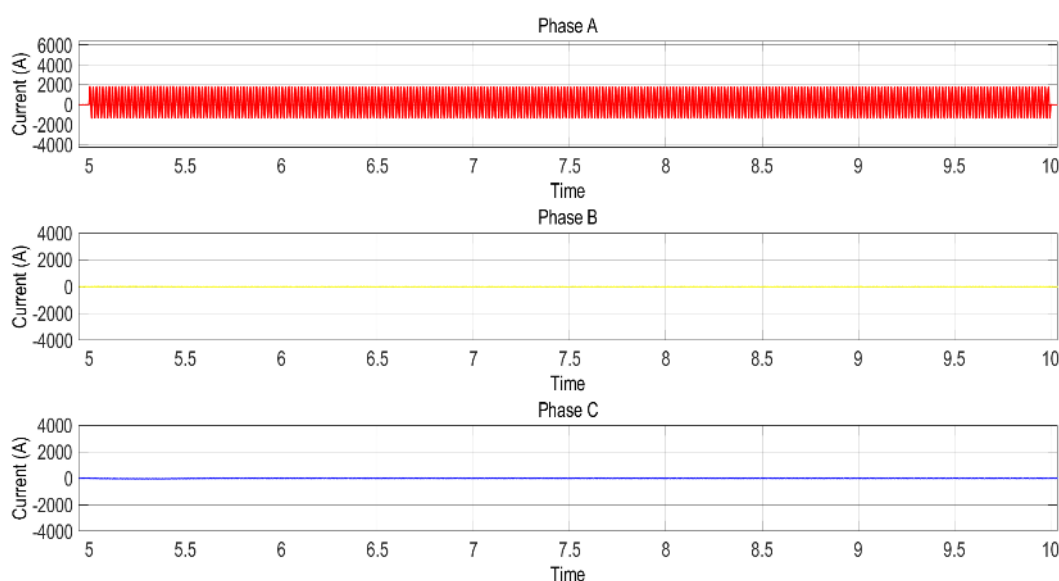


圖 75 母線 1 的單相高阻抗故障電流

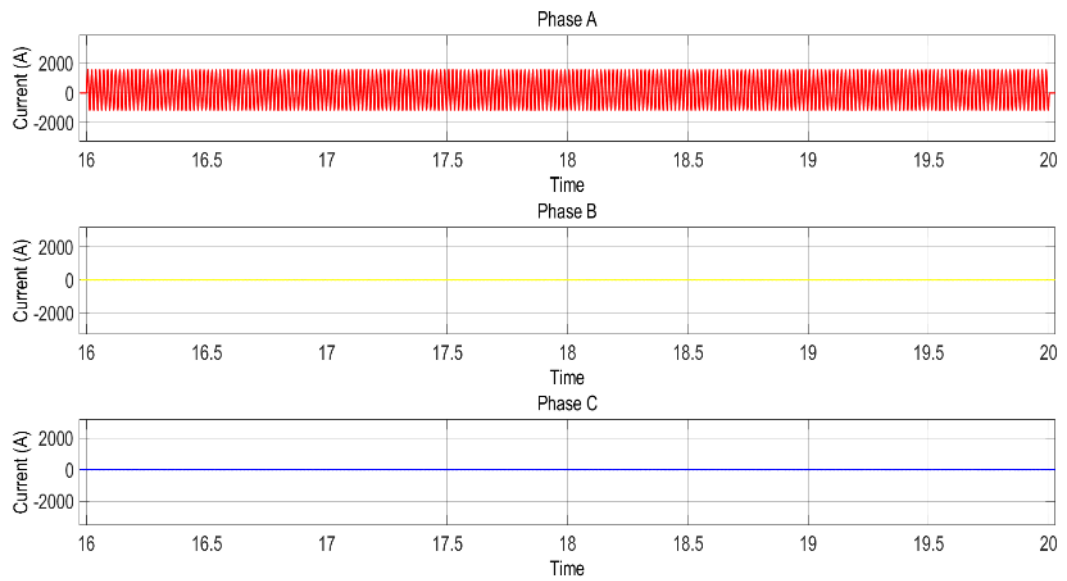


圖 76 母線 2 的單相高阻抗故障電流

五、情境 5

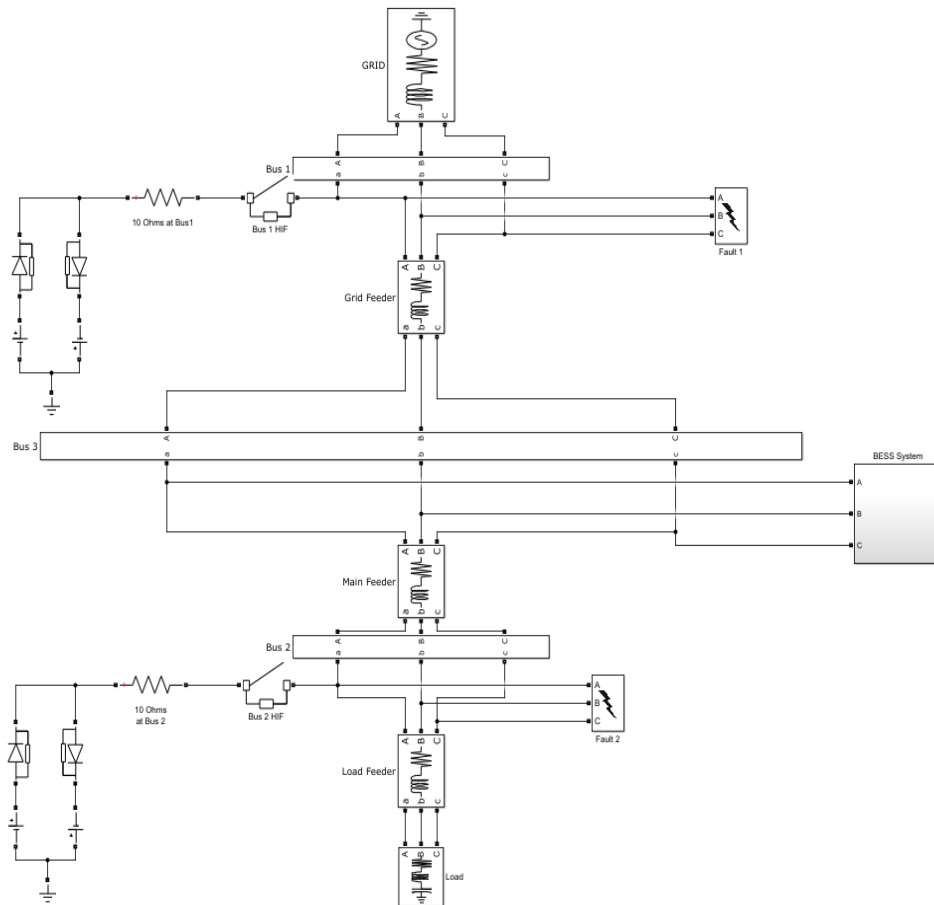


圖 77 具有 VQ 控制的 BESS 系統 Simulink 模型

情境 5 說明具有使用 VQ 控制的 BESS 系統的，其 Simulink 模型如圖 77 所示。內建故障模塊用於模擬平衡三相、單相對地、雙相對地與相對相故障，而對於單相高阻抗故障則使用[24]中描述模型。表 10 表示解析解與 MATLAB Simulink 模擬結果的比較，分別是母線 1 與母線 2 的峰值瞬間電流值與穩態電流值。

表 10 使用 VQ 控制的 BESS 系統其 MATLAB 模擬與解析解的比較

故障型式	峰值/穩態	Simulink 解 (Bus 1)	解析解 (Bus 1)	Simulink 解 (Bus 2)	解析解 (Bus 2)
Three - Phase Fault	Peak	3472	3416	2903	3423
	Instantaneous				
	Steady - State				
Single - line - to - Ground Fault	Peak	1245	1105	1029	1078
	Instantaneous				
	Steady - State				
Double - line - to - Ground Fault	Peak	2366	2139	1940	1997
	Instantaneous				
	Steady - State				
Line - to - line Fault	Peak	1825	1997	1545	1781
	Instantaneous				
	Steady - State				
Single - Phase High Impedance Fault	Peak	552	604	473	566
	Instantaneous				
	Steady - State				

如表 10 所示，解析解與 Simulink 模擬的穩態值接近。另外，峰值瞬間電流值的差異在於式(56)，這是基於[23]的峰值不對稱電流的近似值。VQ 控制的參數如表 11 所示。

表 11 具有 VQ 控制的 BESS 系統參數

電力系統元件	參數
Utility	25 kV (line voltage)
	X/R = 7

	Sbase = 100 MVA
Grid Feeder	R = 1 Ω L = 1 mH
Main Feeder	R = 1 Ω L = 1 mH
Load Feeder	R = 1 Ω L = 1 mH
Load	25 kV (line voltage) 150 kW
	BESS:
	$R_s = 0.009 \Omega$ $I_{BESS} = 6.9282 A$
	Boost Converter:
	$Z_{converter} = 1.902391516 \angle 88.2702185 \Omega$
PV System	Inverter:
	$Z_{inverter} = 0.1804637953 \angle 0.2146032308 \Omega$
	Transformer:
	25 kV/260 V (Y- Δ)
	$Z_{transformer}$ $= 70.69350769 \angle 89.94934434 \Omega$
Single Phase High Impedance	30 Ω

圖 78 至圖 87 說明在不同的平衡與不平衡故障條件下，母線 1 與母線 2 的電流正弦波響應。

從圖 78 得知，當母線 1 發生三相平衡故障時，所有相在故障開始時的電流響應會突然增加，並且會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至 故障持續時間在 10 秒左右結束。

從圖 79 得知，當母線 2 發生三相平衡故障時，所有相在故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至 故障持續時間在 20 秒左右結束。

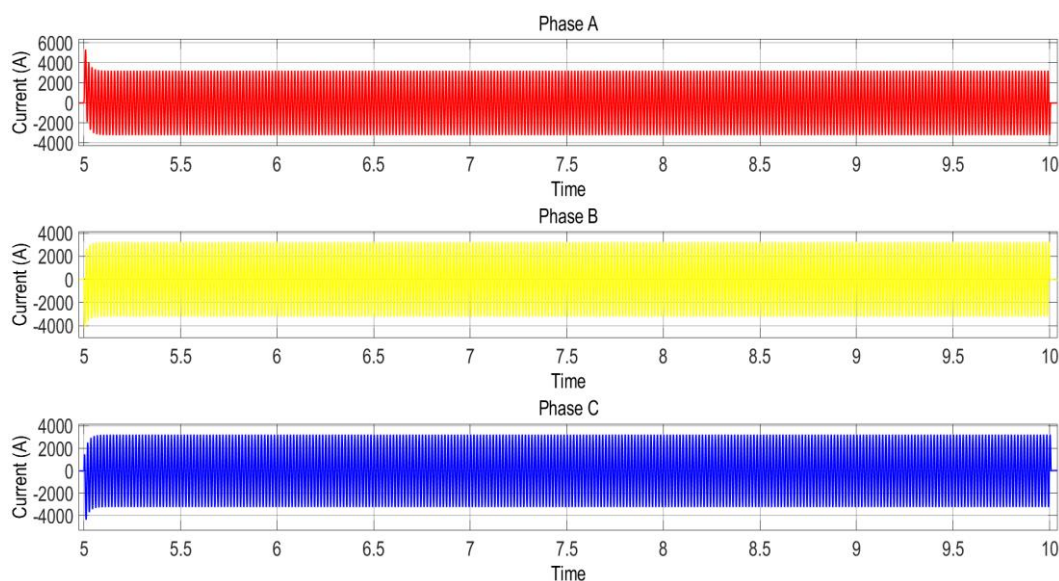


圖 78 母線 1 的三相平衡故障電流

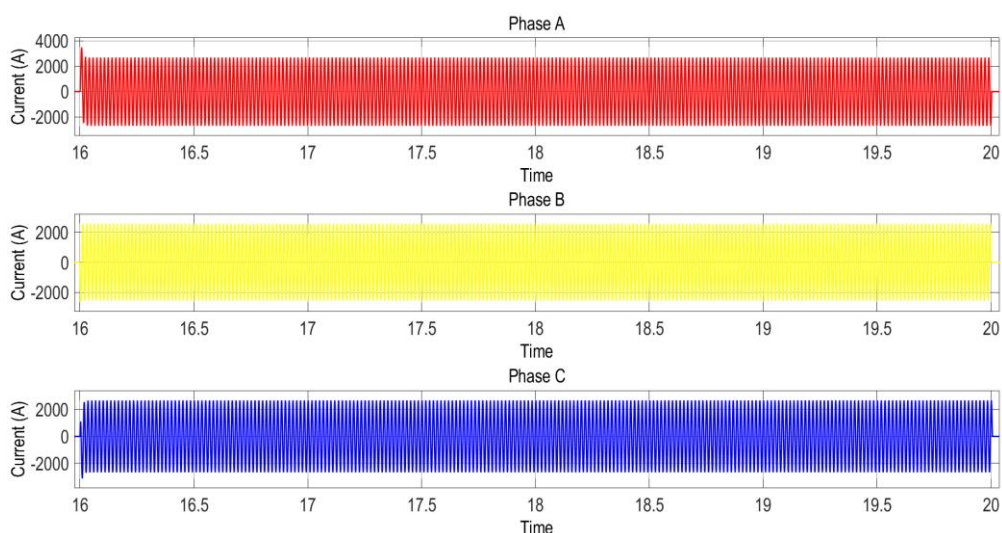


圖 79 母線 2 的三相平衡故障電流

從圖 80 得知，當母線 1 發生單相接地故障時，A 相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 左右結束。由於單線對地故障發生在 A 相，因此 B 相與 C 相不會受到影響。

從圖 81 得知，當母線 2 在 A 相發生單相接地故障時，A 相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於單相接地故障發生在 A 相，因此 B 相與 C 相不會受到影響。

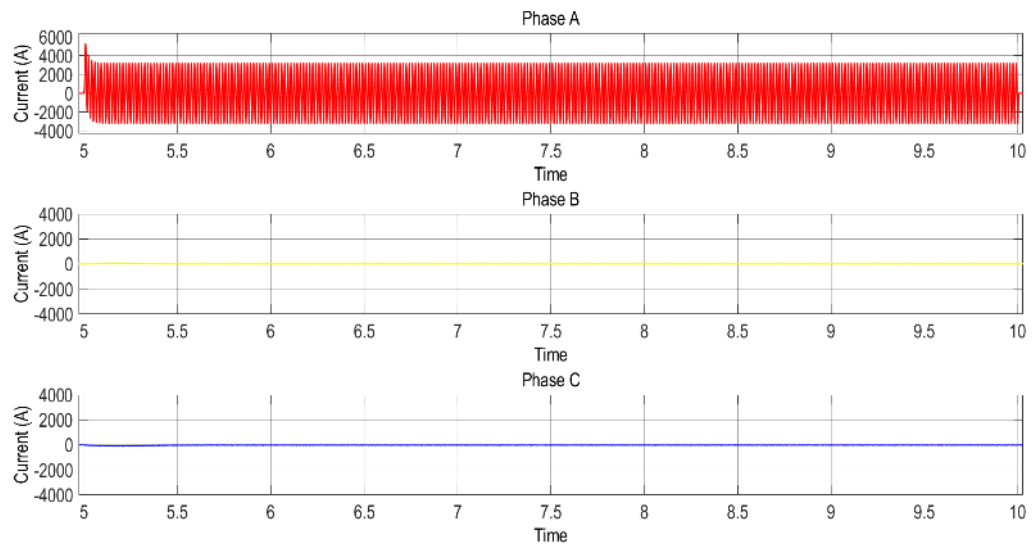


圖 80 母線 1 的單相接地故障電流

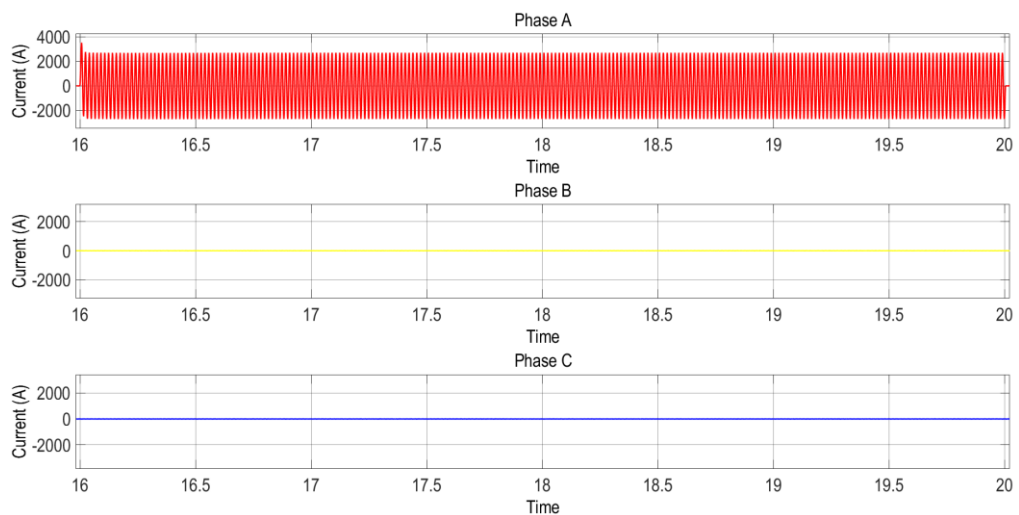


圖 81 母線 2 的單相接地故障電流

從圖 82 得知，當母線 1 在 A 相與 B 相發生雙相接地故障時，A 相與 B 相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生雙相接地故障，因此 C 相不會受到影響。

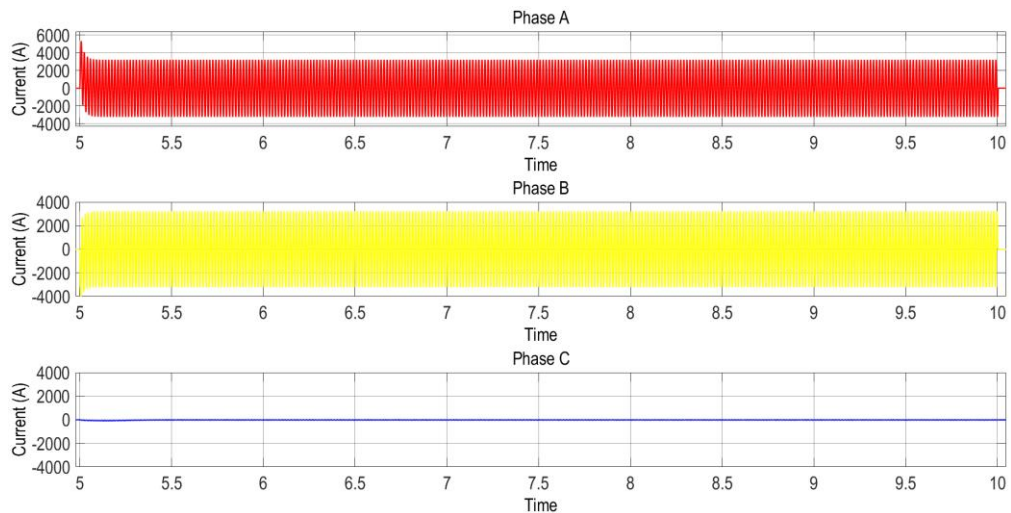


圖 82 母線 1 的雙相接地故障電流

從圖 83 得知，當母線 2 在 A 相與 B 相發生雙相接地故障時，A 相與 B 相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生雙相接地故障，因此 C 相不會受到影響。

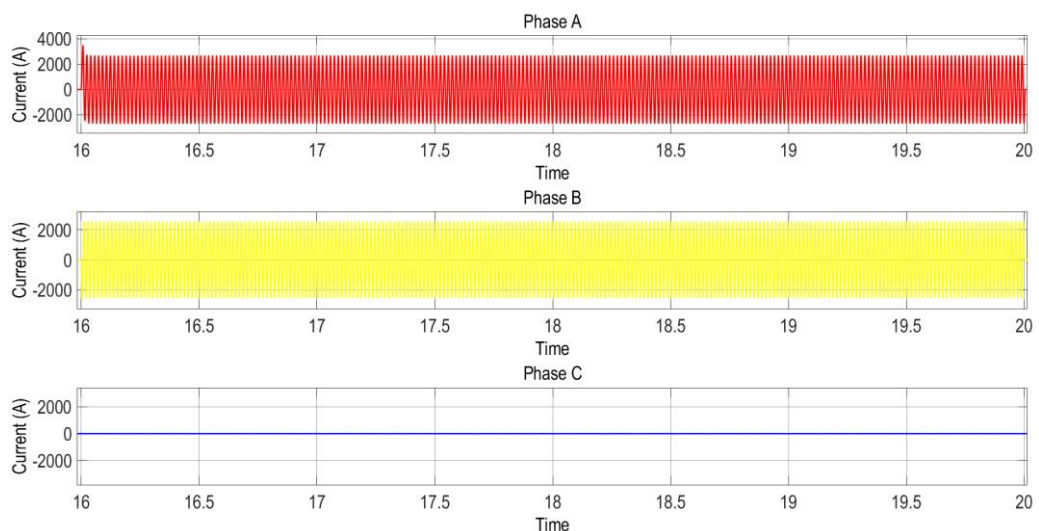


圖 83 母線 2 的雙相接地故障電流

從圖 84 得知，當母線 1 在 A 相與 B 相發生相對相故障時，A 相與 B 相故障開始時電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生相對相故障，因此 C 相不會受到影響。

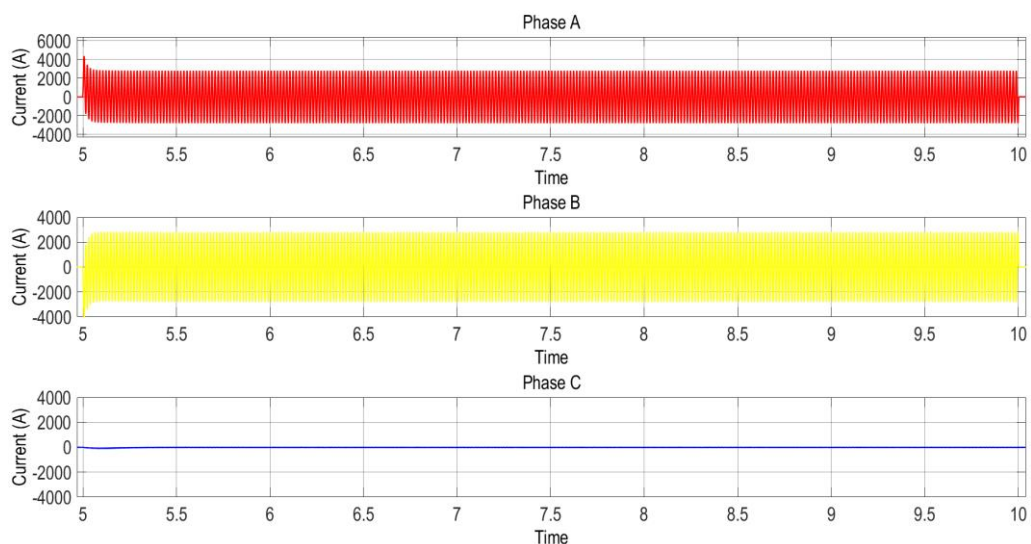


圖 84 母線 1 的相對相故障電流

從圖 85 得知，當母線 2 在 A 相與 B 相發生相對相故障時，A 相與 B 相故障開始時電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生相對相故障，因此 C 相不會受到影響。

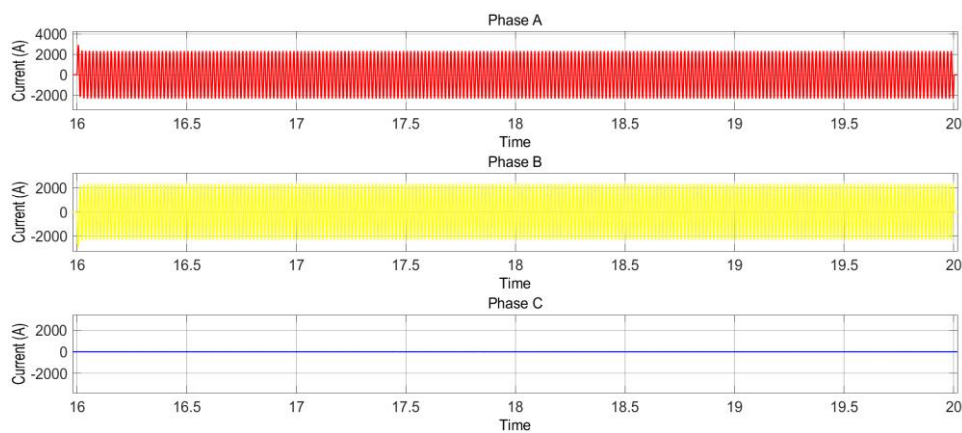


圖 85 母線 2 的相對相故障電流

單相高阻抗故障的響應與相對地故障的響應相同，如圖 86 與圖 87 所示。不同處在於單相高阻抗故障由於連接高阻抗，其峰值瞬間電流值與穩態故障電流，相較線對地故障低很多。

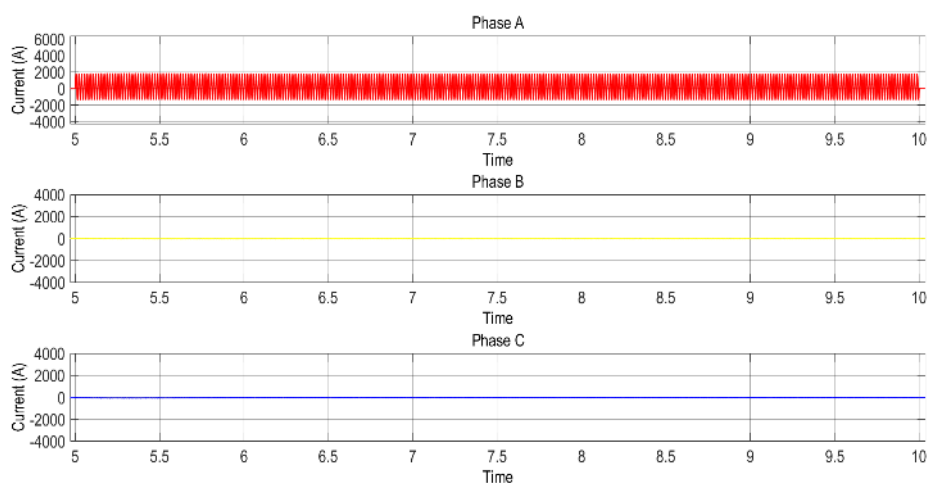


圖 86 母線 1 的單相高阻抗故障電流

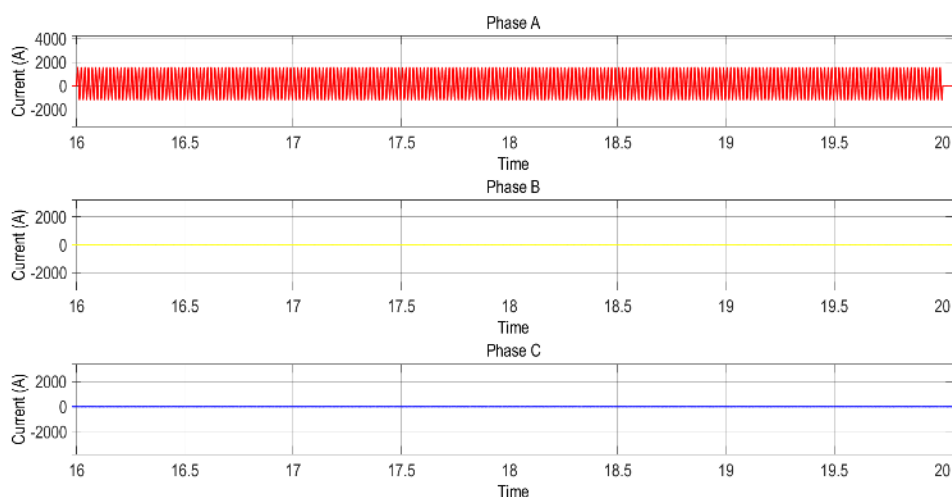


圖 87 母線 2 的單相高阻抗故障電流

六、情境 6

情境 6 說明 BESS 系統使用 Pf 控制的模擬情境，其 Simulink 模型如圖 88 所示。內建故障模塊用於模擬平衡三相、單相對地、雙相對地與相對相故障，而對於單相高阻抗故障則使用[24]中描述的模式。表 10 為解析解與 MATLAB Simulink 的模擬結果比較，分別是母線 1 與母線 2 的峰值瞬間電流值與穩態值。

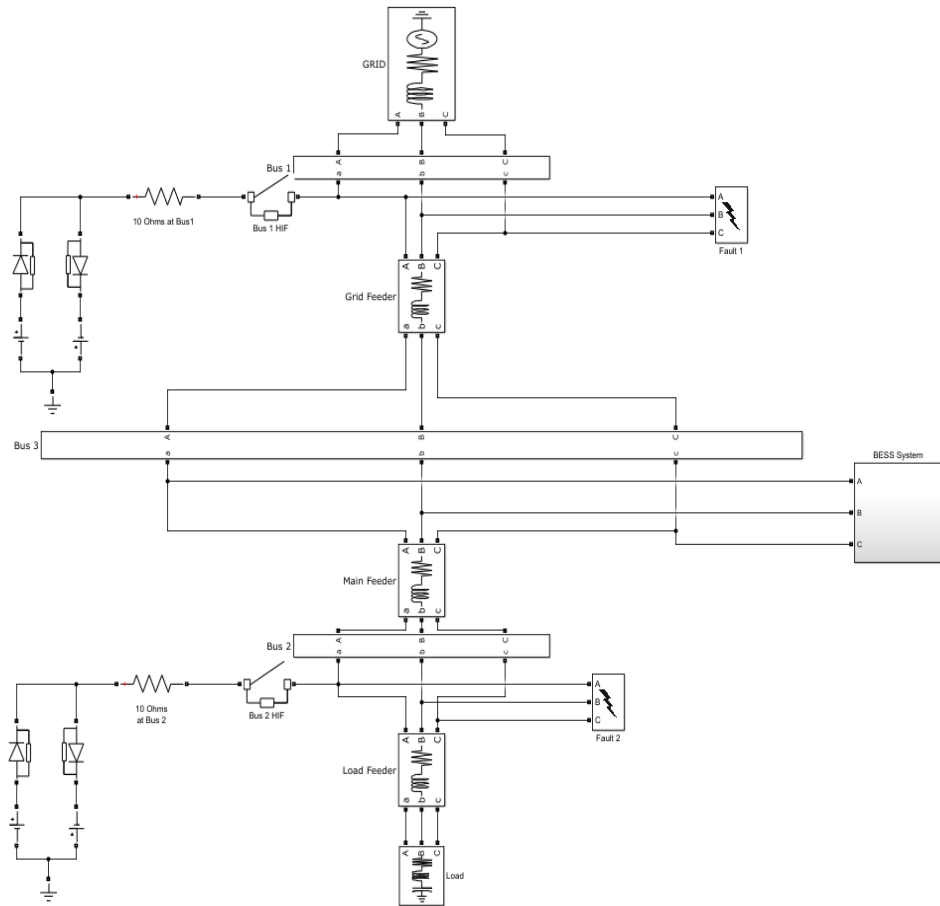


圖 88 具有 Pf 控制的 BESS 系統 Simulink 模型()

表 12 使用 Pf 控制的 BESS 系統其 MATLAB 模擬與解析解的比較

故障型式	峰值/穩態	Simulink 解 (Bus 1)	解析解 (Bus 1)	Simulink 解 (Bus 2)	解析解 (Bus 2)
Three - Phase Fault	Peak	3472	3416	2804	3423
	Instantaneous				
Single - line - to - Ground Fault	Steady - State	3233	3347	2641	2617
	Peak				
Double - line - to - Ground Fault	Instantaneous	1245	1105	971	1078
	Steady - State	1084	1075	859	820
Line - to - line Fault	Peak	2367	2139	1879	1997
	Instantaneous				
Line - to - line Fault	Steady - State	2162	2036	1753	1735
	Peak				
Line - to - line Fault	Instantaneous	1824	1997	1594	1781
	Steady - State	1617	1705	1418	1365

Single - Phase High Impedance Fault	Peak Instantaneous Steady - State	553	604	473	566
		546	545	468	430

如表 12 所示，解析解與 Simulink 模擬的穩態值彼此接近。另外，峰值瞬間電流值的差異在於式(56)，這是基於[23]的峰值不對稱電流的近似值。使用 VQ 控制的參數如表 13 所示。

表 13 具有 Pf 控制的 BESS 系統的參數

電力系統元件	參數
Utility	25 kV (line voltage) X/R = 7 Sbase = 100 MVA
Grid Feeder	R = 1 Ω L = 1 mH
Main Feeder	R = 1 Ω L = 1 mH
Load Feeder	R = 1 Ω L = 1 mH
Load	25 kV (line voltage) 150 kW
	BESS: $R_s = 0.009 \Omega$ $I_{BESS} = 6.9282 A$
	Boost Converter: $Z_{converter} = 1.902391516\angle 88.2702185 \Omega$
PV System	Inverter: $Z_{inverter} = 0.1804637953\angle 0.2146032308 \Omega$
	Transformer: 25 kV/260 V (Y- Δ) $Z_{transformer}$ $= 70.69350769\angle 89.94934434 \Omega$
Single Phase High Impedance	30 Ω
Pf Control Parameters	L = 250 μ H $K_p^I = 3 \times 10^{-50}$ $m_i = m_i^* = 1$

圖 89 至圖 98 分別明在不同的平衡與不平衡故障條件下，母線 1 與母線 2 的電流正弦波響應。

從圖 89 得知，當母線 1 發生三相平衡故障時，所有相在故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值保持，直至故障續時間在 10 秒左右結束。

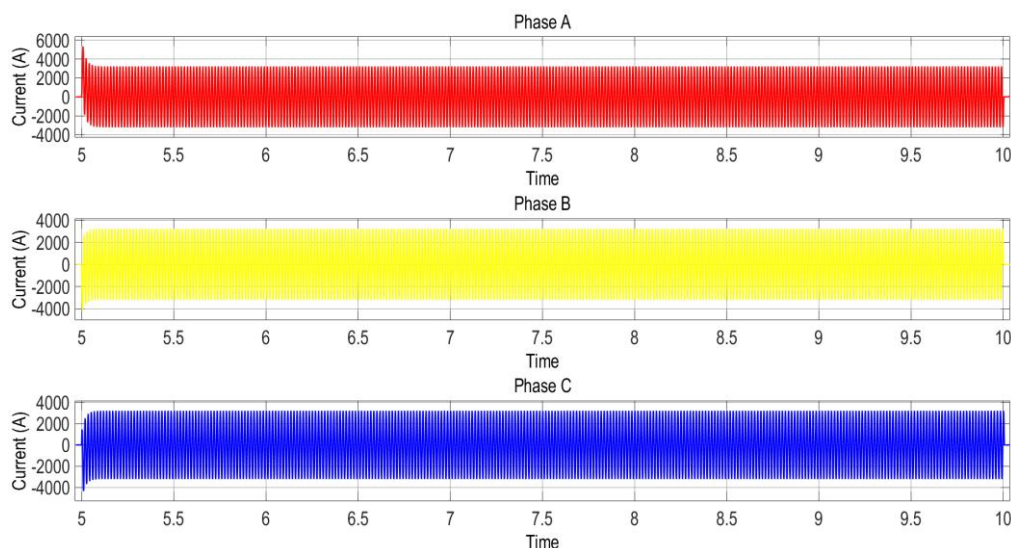


圖 89 母線 1 的三相平衡故障電流

從圖 90 得知，當母線 2 發生三相平衡故障時，所有相的電流響應在故障開始時突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。

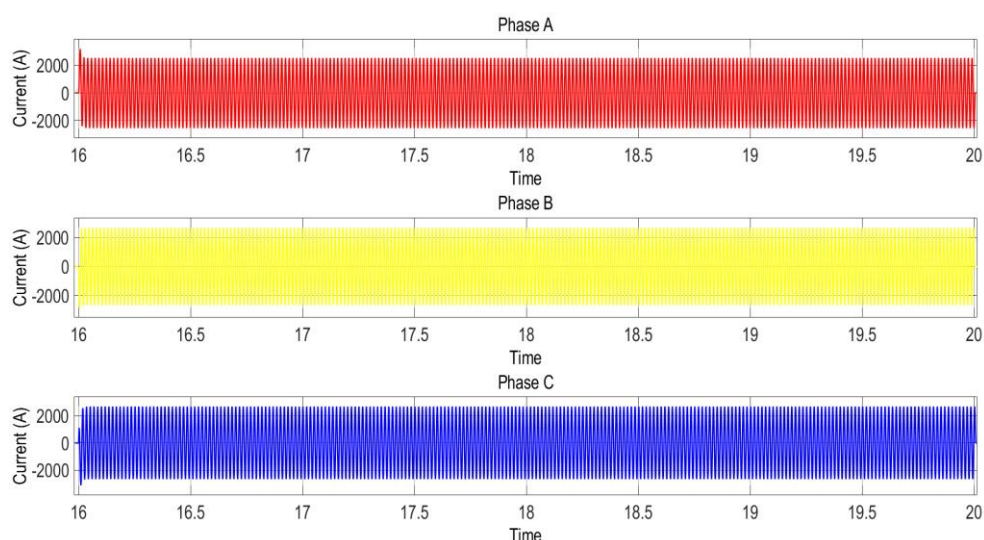


圖 90 母線 2 的三相平衡故障電流

從圖 91 得知，當母線 1 在 A 相發生單相接地故障時，A 相故障開始時的電流響應會突然增加，並在會 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，

直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於單相接地故障發生在 A 相，因此 B 相與 C 相不會受到影響。

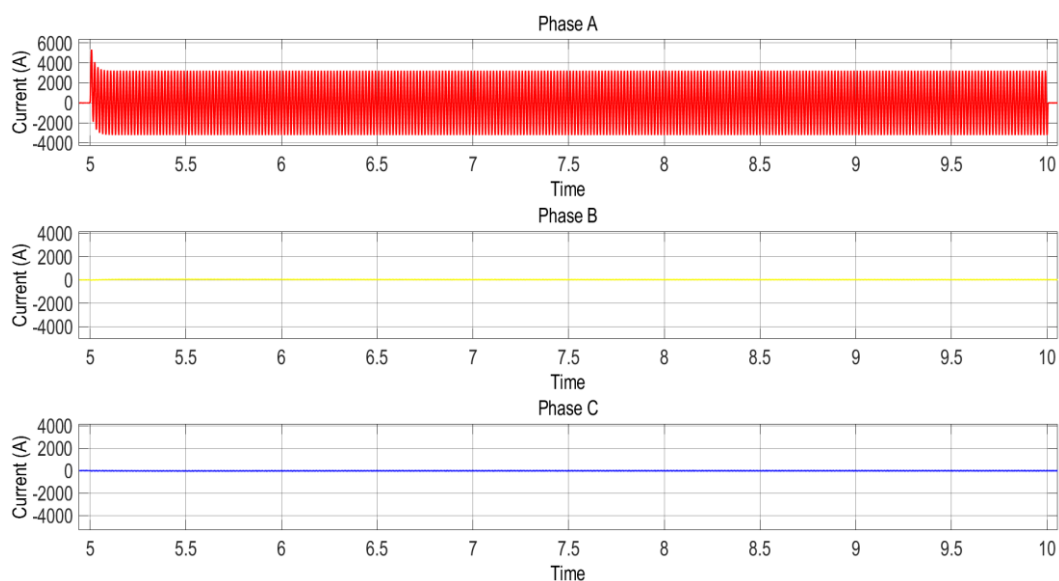


圖 91 母線 1 的單相接地故障電流

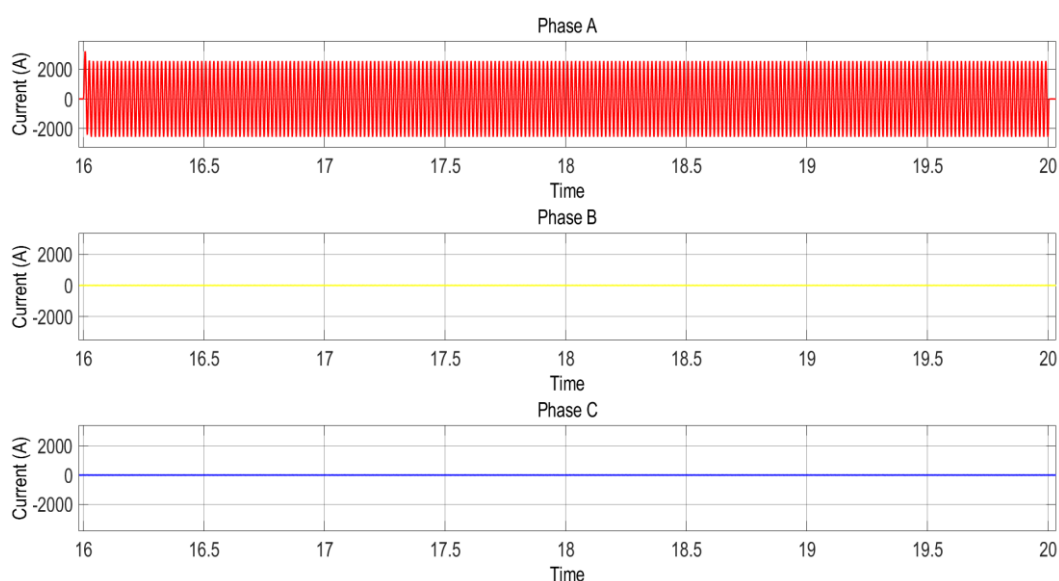


圖 92 母線 2 的單相接地故障電流

從圖 92 得知，當母線 2 在 A 相發生單相接地故障時，A 相故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並將保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於單相接地故障發生在 A 相，因此 B 相與 C 相不會受到影響。

從圖 93 得知，當母線 1 在 A 相與 B 相發生雙相接地故障時，A 相與 B 相在故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生雙相接地故障，因此 C 相不會受到影響。

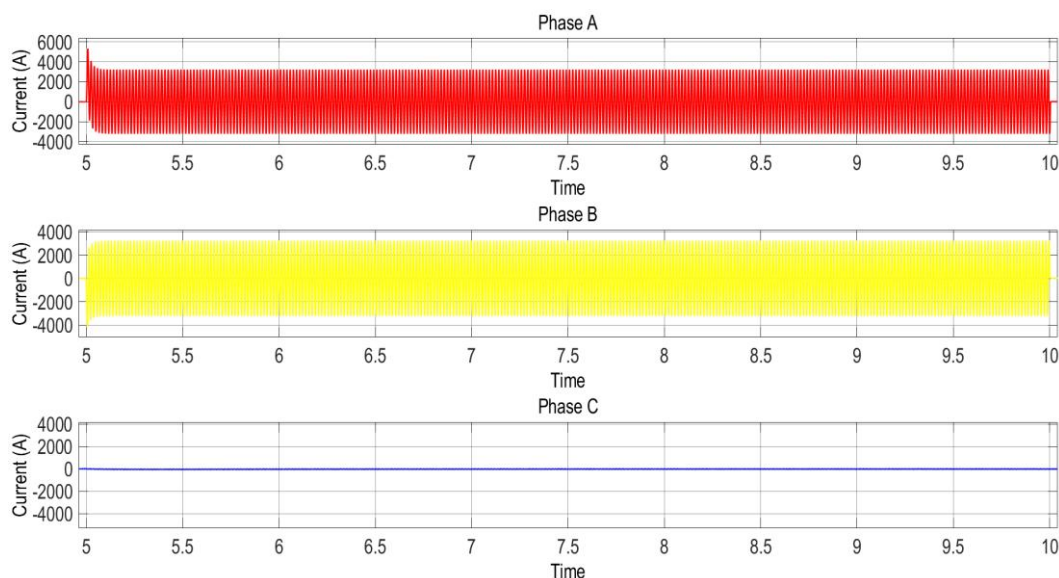


圖 93 母線 1 的雙相接地故障電流

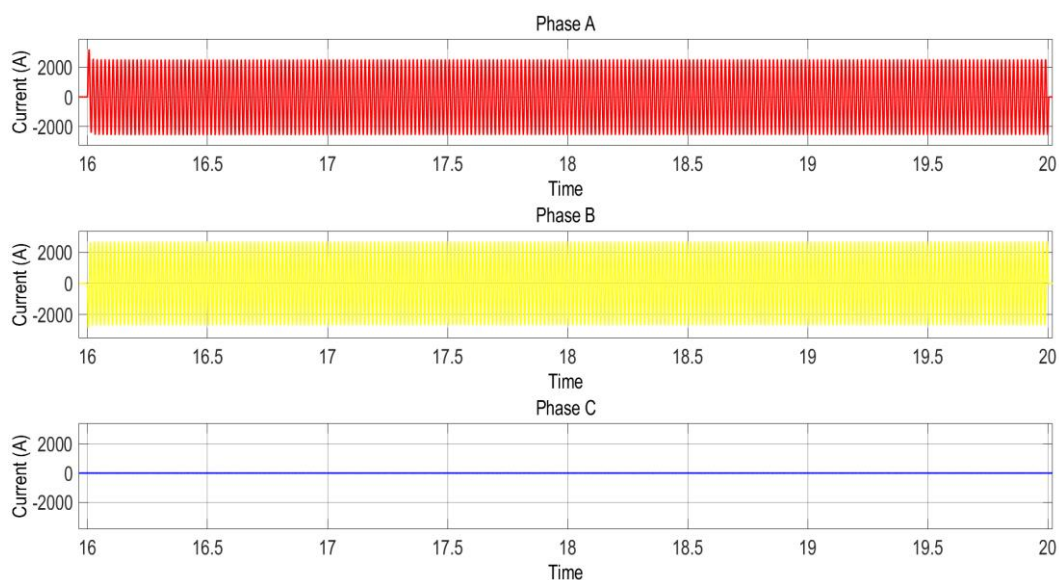


圖 94 母線 2 的雙相接地故障電流

從圖 94 得知，當母線 2 在 A 相與 B 相發生雙相接地故障時，A 相與 B 相在故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生雙相接地故障，因此 C 相不會受到影響。

穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生雙相接地故障，因此 C 相不會受到影響。

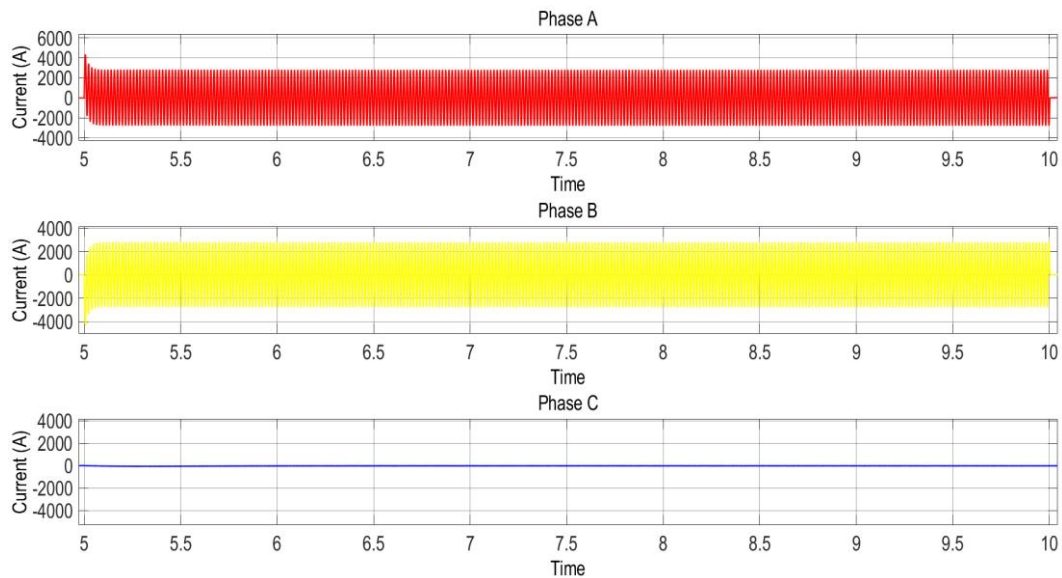


圖 95 母線 1 的相對相故障電流

從圖 95 得知，當母線 1 在 A 相與 B 相發生相對相故障時，A 相與 B 相故障在開始時電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 10 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生相對相故障，因此 C 相不會受到影響。

從圖 96 得知，當母線 2 在 A 相與 B 相發生相對相故障時，A 相與 B 相在故障開始時的電流響應會突然增加，並會在 3 個週期後逐漸衰減至其穩態值並保持，直至故障持續時間在 20 秒左右結束。由於 A 相與 B 相發生相對相故障，因此 C 相不會受到影響。

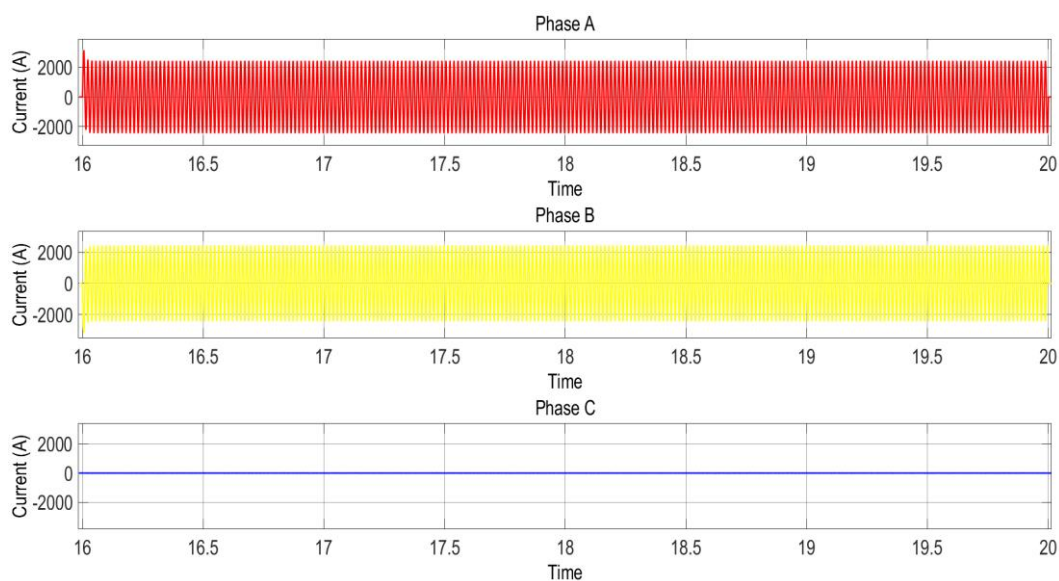


圖 96 母線 2 的相對相故障電流

單相高阻抗故障的響應與相對地故障的響應相同，如圖 97 與圖 98 所示。不同處在於，單相高阻抗故障由於連接高阻抗，其峰值瞬間電流值與穩態故障電流，相較線對地故障低很多。

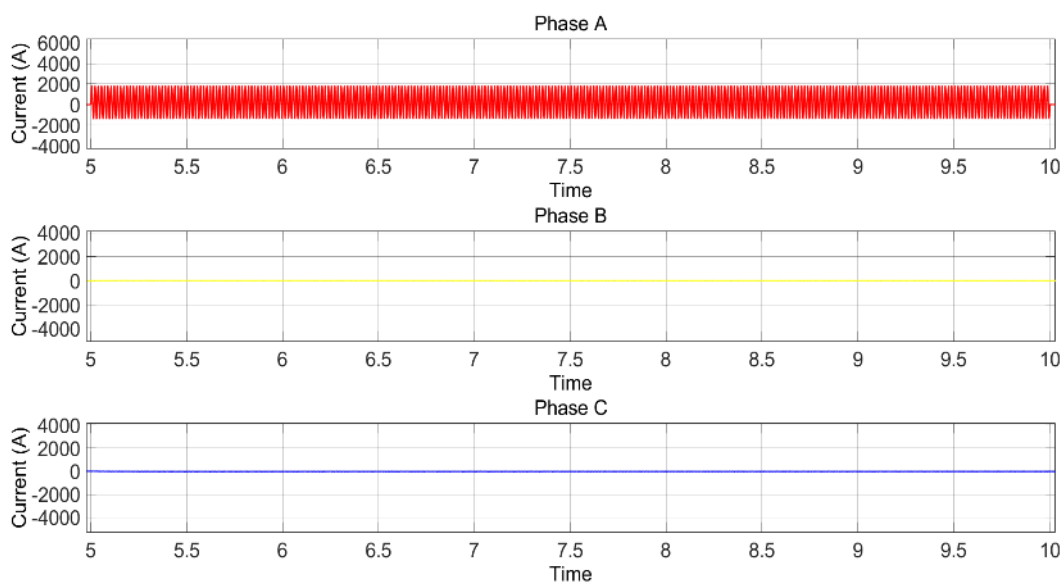


圖 97 母線 1 的單相高阻抗故障電流

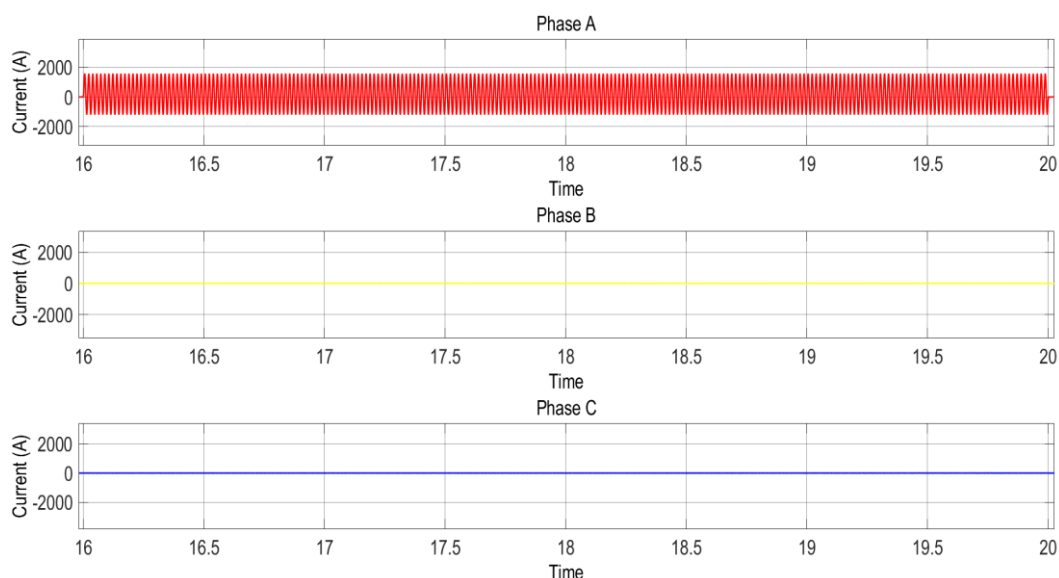


圖 98 母線 2 的單相高阻抗故障電流

伍、即時模擬

表 1 中的不同測試情境被轉換為即時數位模擬模型，並使用 Opal-RT 即時數位模擬器(eMegasim)，轉換後模型如圖 99 所示。該模型使用 4 個核心進行即時模擬。核心 1 具有 SM_sys1 區塊，包含 IBDG 系統中連接於母線 3 的所有元件；核心 2 具有 SS_sys2 區塊，包含負載中連接在母線 2 中的所有元件；核心 3 具有 SS_sys3 區塊，包含電網中連接母線 1 的所有元件；核心 4 具有 SS_IO 區塊，其中包含所有元件、測量區塊以及與外部輸出(示波器)的連接。主機規格為 i9 - 10900F 處理器與 64GB RAM。在第六章則使用 power hardware in the loop 進行模擬。每個情境皆使用離散模式，總持續時間為 3 秒，採樣時間為 50 μ s。母線 1 會在 0.5 秒時發生故障，並在 1 秒時結束，而母線 2 會在 2 秒時發生另一個故障，並於 2.5 秒時結束。由於 Opal-RT 的限制，轉換器與逆變器等電力電子設備被轉換為平均模型。電力電子元件的轉換在輸出上並無太大差異。

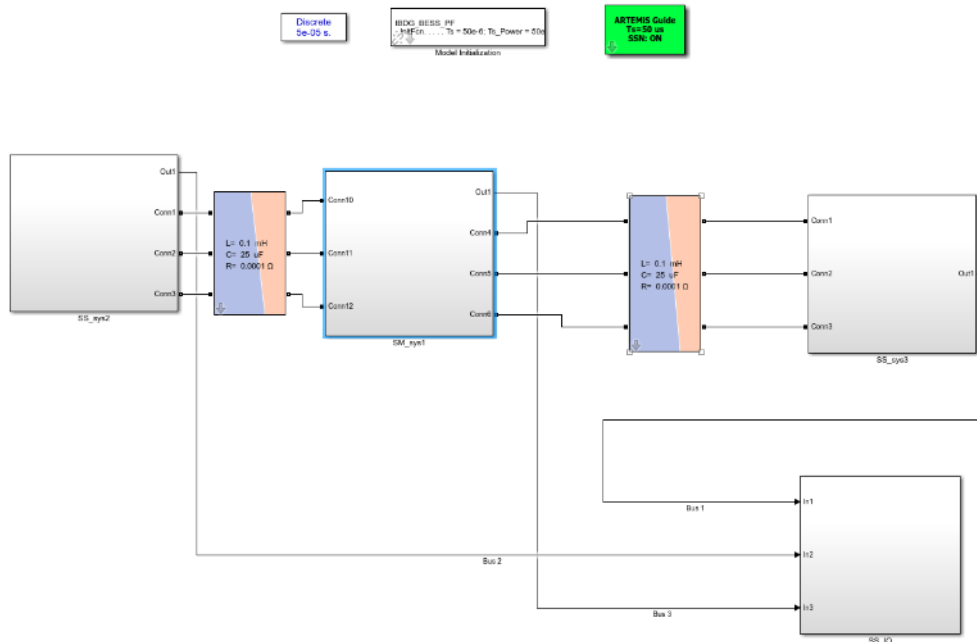


圖 99 使用不同控制方案的 IBDG (PV 與 BESS)系統的即時模擬模型

圖 100 與圖 101 說明具 IBDG 系統在三相平衡故障條件下，母線 1 與母線 2 的電壓與電流響應。

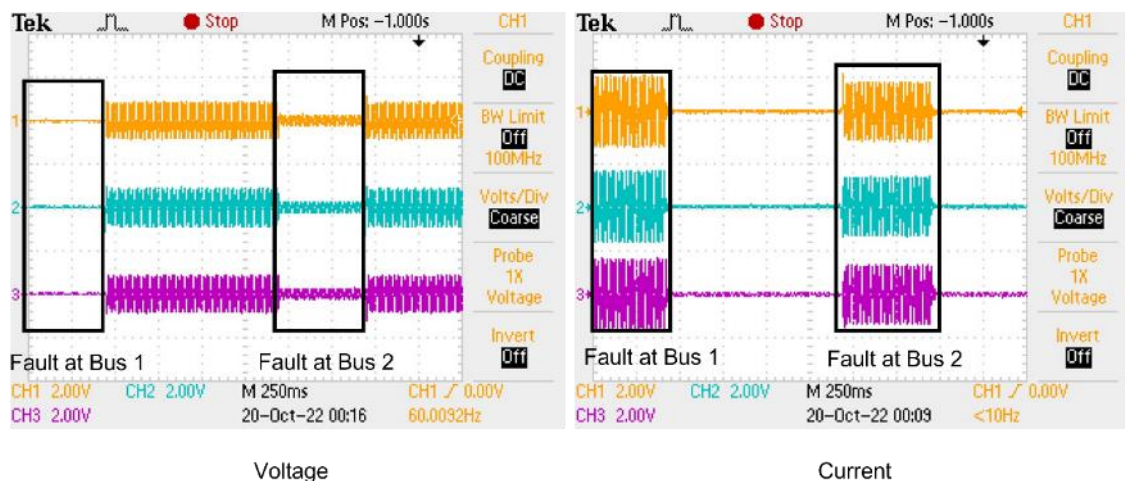


圖 100 母線 1 發生三相平衡故障時的電壓與電流響應

如圖 100 所示，當發生三相平衡故障時，母線 1 的電壓在所有相中皆降低到接近零值，並且在所有相中的電流都會增加。每個故障持續時間為 0.5 秒。圖 101 說明在三相故障條件下母線 2 的電壓與電流響應。與母線 1

不同，母線 2 的電流響應僅在母線 2 發生三相平衡故障時會受到影響，而母線 1 則幾乎不受影響，當母線 1 發生三相平衡故障時，因系統端阻抗較低，其故障電流僅流回母線 1，而母線 2 具有從母線 1 連接到母線 3 以及母線 3 到母線 2 的串聯阻抗。

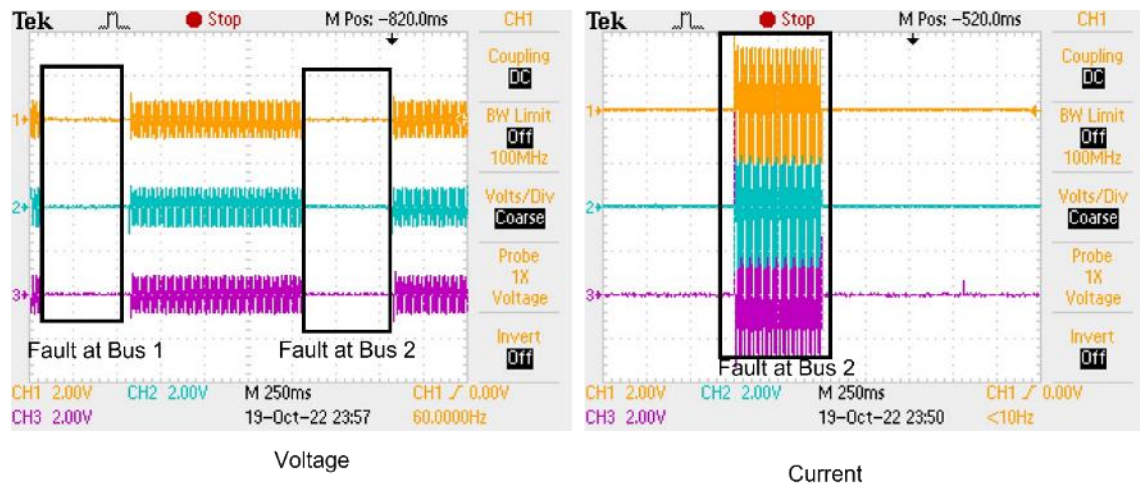


圖 101 母線 2 發生三相平衡故障時的電壓與電流響應

圖 102 與圖 103 說明具 IBDG 系統在單相接地故障條件下，母線 1 與母線 2 的電壓與電流響應。

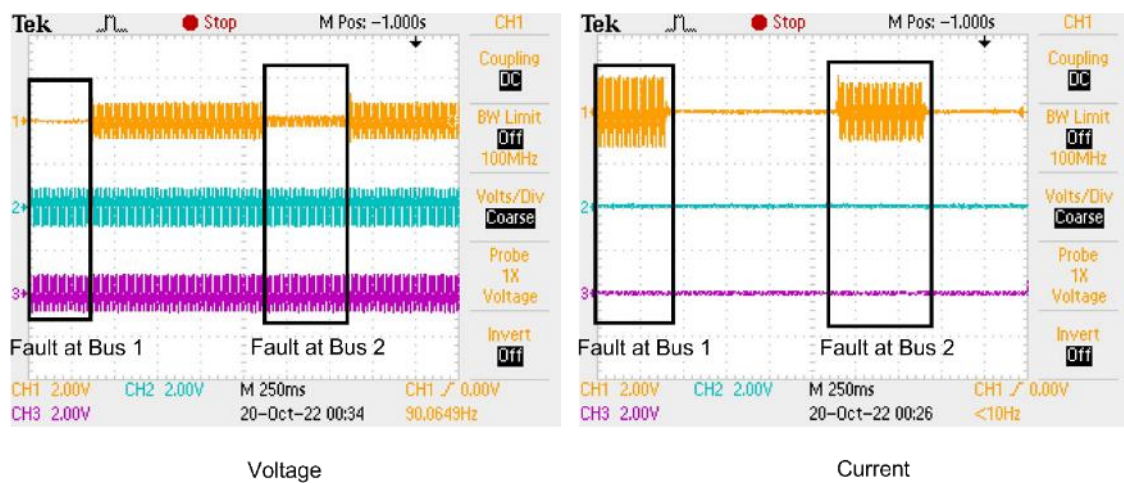


圖 102 母線 1 發生單相接地故障時的電壓與電流響應

如圖 102 所示，當發生單相接地故障時，母線 1 的電壓在發生故障的相(A 相)中會降低接近為零值，同時在故障相的電流也會增加。每個故障持續時間為 0.5 秒。圖 103 為單相接地故障條件下，母線 2 的電壓與電流響應。與母線 1 不同，母線 2 的電流響應僅在母線 2 發生單相接地故障時受到影響，而母線 1 則幾乎不受影響，當母線 1 發生單相接地故障時，因連接母線 1 的系統端阻抗較低，故障電流僅流回母線 1，這與母線 2 不同，母線 2 具有從母線 1 連接到母線 3 以及母線 3 到母線 2 的串聯阻抗。

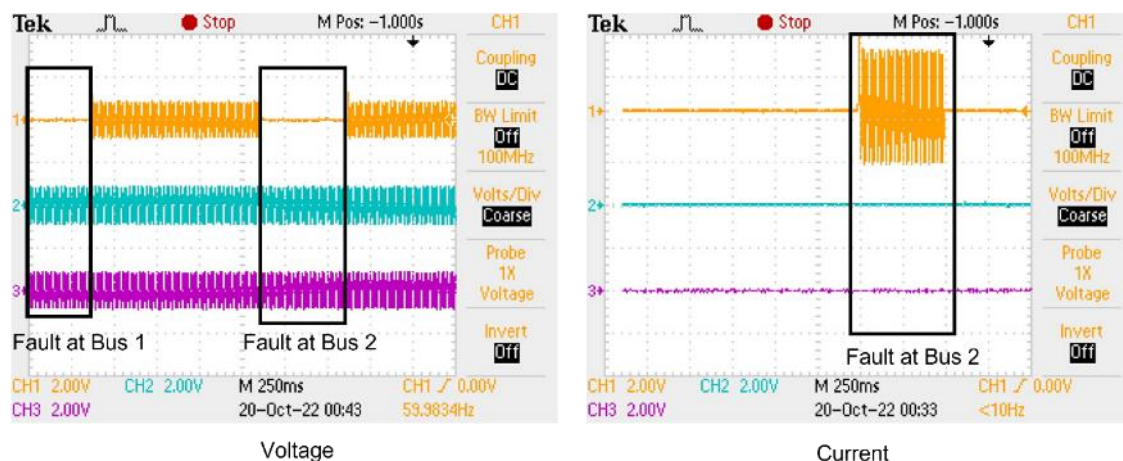


圖 103 母線 2 發生單相接地故障時的電壓與電流響應

圖 104 與圖 105 說明具 IBDG 系統在雙相接地故障條件下，母線 1 與母線 2 的電壓與電流響應。如圖 104 所示，當發生雙相接地故障時，母線 1 的電壓在發生故障的相(A 相與 B 相)中會降至大約為零值，而電流在故障相也會增加。每個故障持續時間為 0.5 秒。圖 105 說明雙相接地故障條件下，母線 2 的電壓與電流響應。與母線 1 不同，母線 2 的電流響應僅在母線 2 發生雙相接地故障時會受到影響，而母線 1 則幾乎不受影響，當母線 1 發生雙相接地故障時，因連接至母線 1 的系統阻抗較低，故障電流僅流回至

母線 1，這與母線 2 不同，母線 2 具有從母線 1 連接到母線 3 以及母線 3 到母線 2 的串聯阻抗。

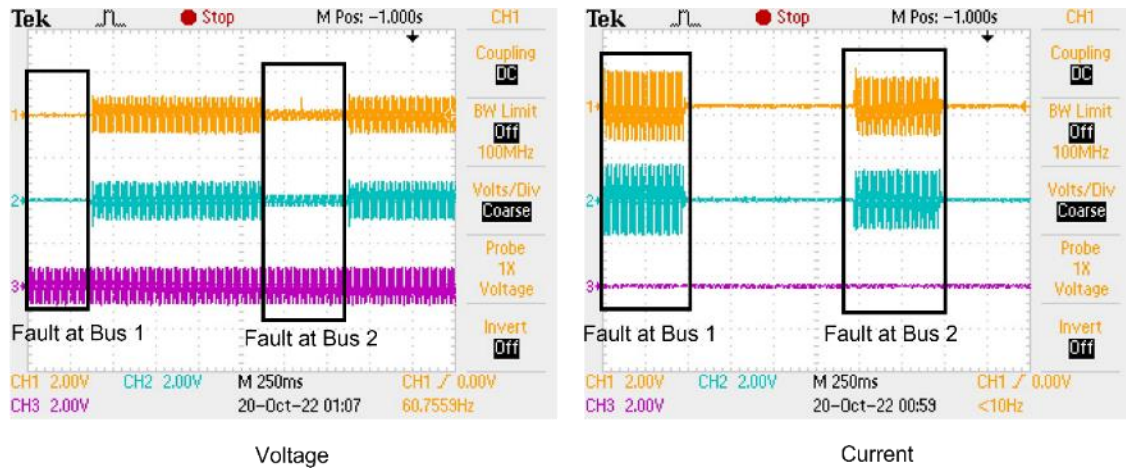


圖 104 母線 1 發生雙相接地故障時的電壓與電流響應

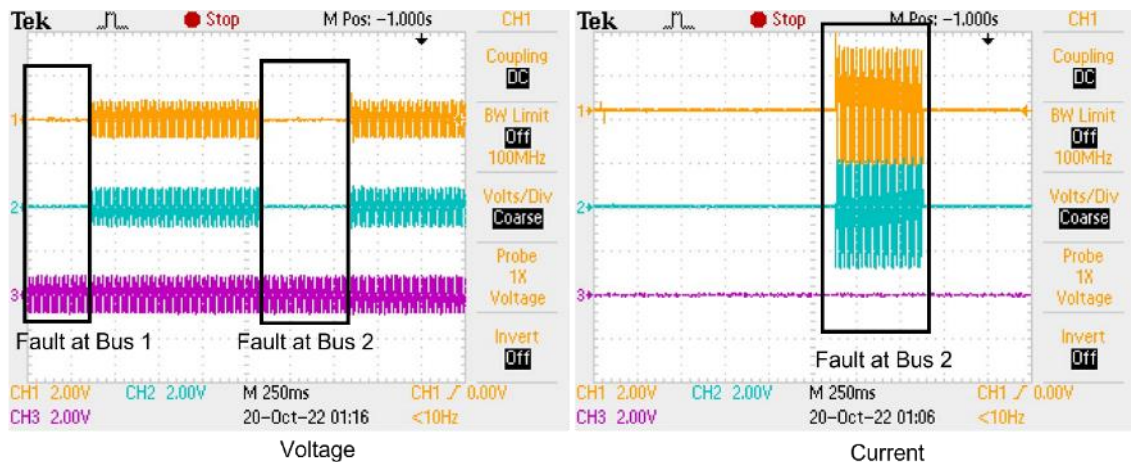


圖 105 母線 2 發生雙相接地故障的電壓與電流響應

圖 106 與圖 107 說明在具 IBDG 系統的相對相故障條件下，母線 1 與母線 2 的電壓與電流響應。

如圖 106 所示，當發生相對相故障時，母線 1 的電壓在故障相(A 相與 B 相)會下降，而電流在故障相會增加，並且相距 180° 。每個故障持續時間

為 0.5 秒。圖 107 說明母線 2 在相對相故障情況下的電壓與電流響應。與母線 1 不同，母線 2 的電流響應僅在母線 2 發生相對相故障時受到影響，而母線 1 則不受影響，這是因為當母線 1 發生相對相故障時，因連接到母線 1 的阻抗較低，故障電流僅流回至母線 1，這與母線 2 不同，母線 2 具有從母線 1 連接到母線 3 與母線 3 連接到母線 2 的串聯饋線。

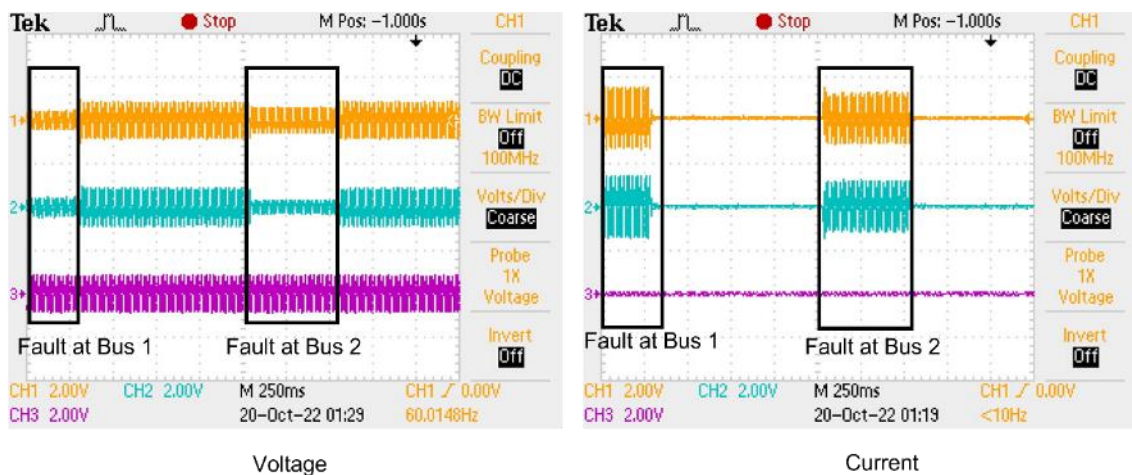


圖 106 母線 1 發生相對相故障故障時的電壓與電流響應

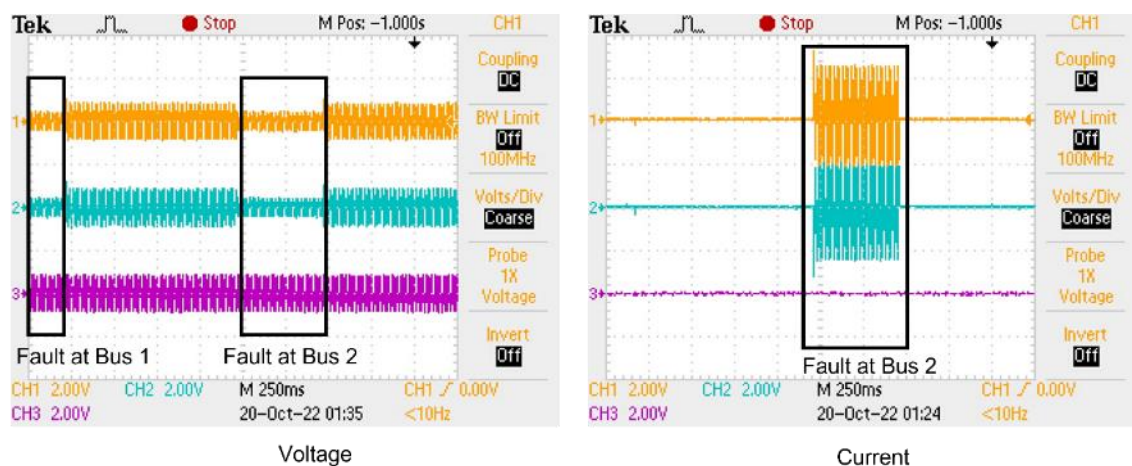


圖 107 母線 2 發生相對相線故障時的電壓和電流響應

圖 108 與圖 109 說明具 IBDG 系統在單相高阻抗故障條件下，母線 1 與母線 2 的電壓與電流響應。

如圖 108 所示，當單相高阻故障發生時，母線 1 的電壓在發生故障相 (A 相) 中會下降，而在故障相上的電流會增加。與單線對地故障不同，由於在故障相中連接一個附加阻抗，因此故障相中的相電壓降低會較小的。另外，對於故障相的暫態與穩態條件，其電流值幾乎相同。每個故障持續時間為 0.5 秒。圖 109 說明單相高阻抗故障條件下母線 2 的電壓與電流響應。與母線 1 不同，母線 2 的電流響應僅在母線 2 發生單相高阻故障時受到影響，而母線 1 則幾乎不受影響，當母線 1 發生單相高阻故障時，因連接到母線 1 的阻抗較低，故障電流僅返回到母線 1，這與母線 2 不同，母線 2 具有從母線 1 連接到母線 3 與母線 3 連接到母線 2 的串聯。

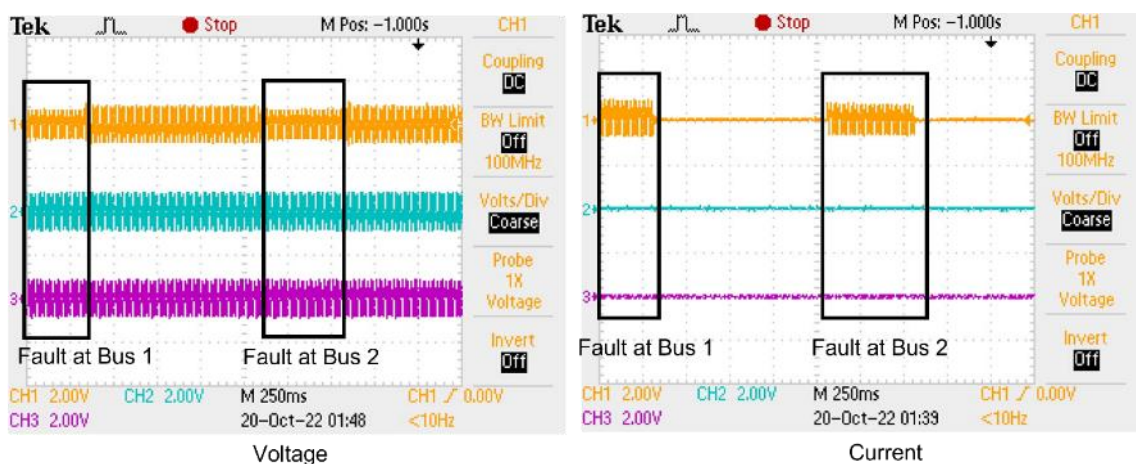


圖 108 母線 1 發生單相高阻抗故障時的電壓與電流響應

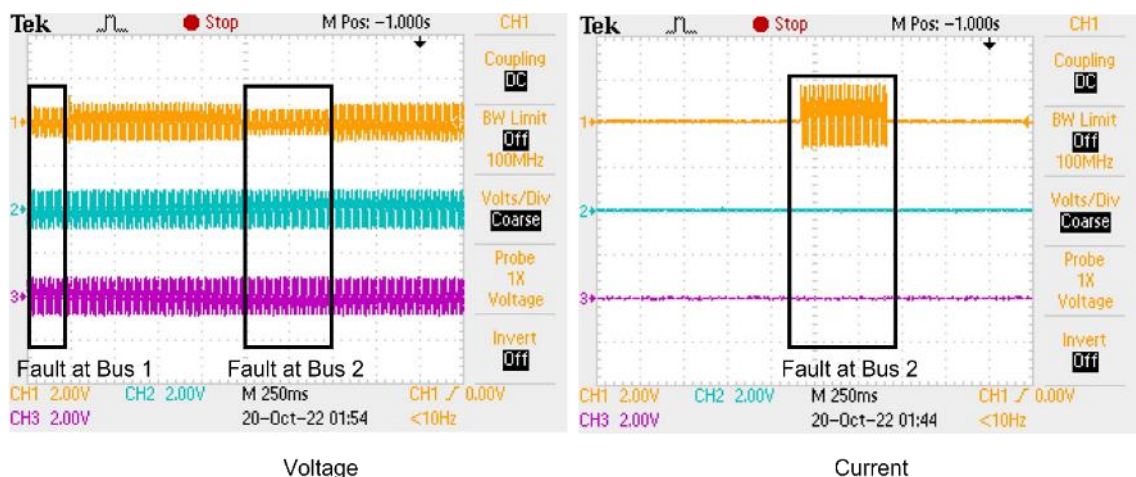


圖 109 母線 2 發生單相高阻抗故障時的電壓與電流響應

對於所有情境，電壓讀數每 25kV 縮放至 1V，而電流讀數每 2kA 縮放至 1V。在進行實施 power hardware in the loop 模擬實驗之前，以即時模擬驗證具 IBDG 系統在 MATLAB 具有不同控制方案的響應。

陸、功率硬體迴圈模擬實驗(Power Hardware in the Loop Simulation)

為觀察不同故障條件對實際負載的影響，我們進行一項陸、功率硬體迴圈模擬實驗。實際使用一個 $220\ \Omega/500\ \text{W}$ 變阻器的負載，並以星形連接。迴路中的電源硬體如圖 110 所示，包含一個 3 相交流功率電源、用於放大 eMegasim 的電壓信號、連接到電阻負載的每一相的電壓與電流傳感器、示波器與主機。由於每個控制模式的故障響應已使用即時模擬進行驗證，情境 2(使用 PQ 控制的 PV 系統)與情境 4(使用 PQ 控制的 BESS 系統)會用於底下的 Power Hardware- in-the Loop 的實驗。在三相電源電壓分別為 100V、150V 與 200 V 的三個實驗中測量其相電壓與相電流。

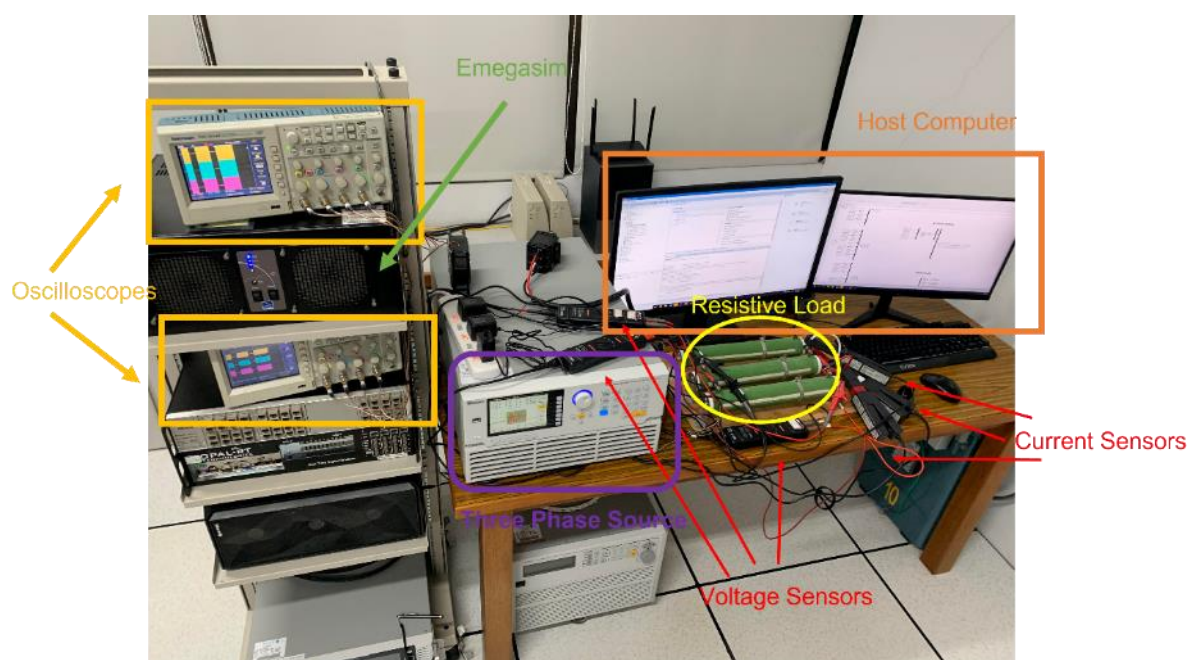


圖 110 功率硬體迴圈模擬實驗

圖 111 至圖 120 分別說明不同的功率硬體迴圈模擬實驗的結果。

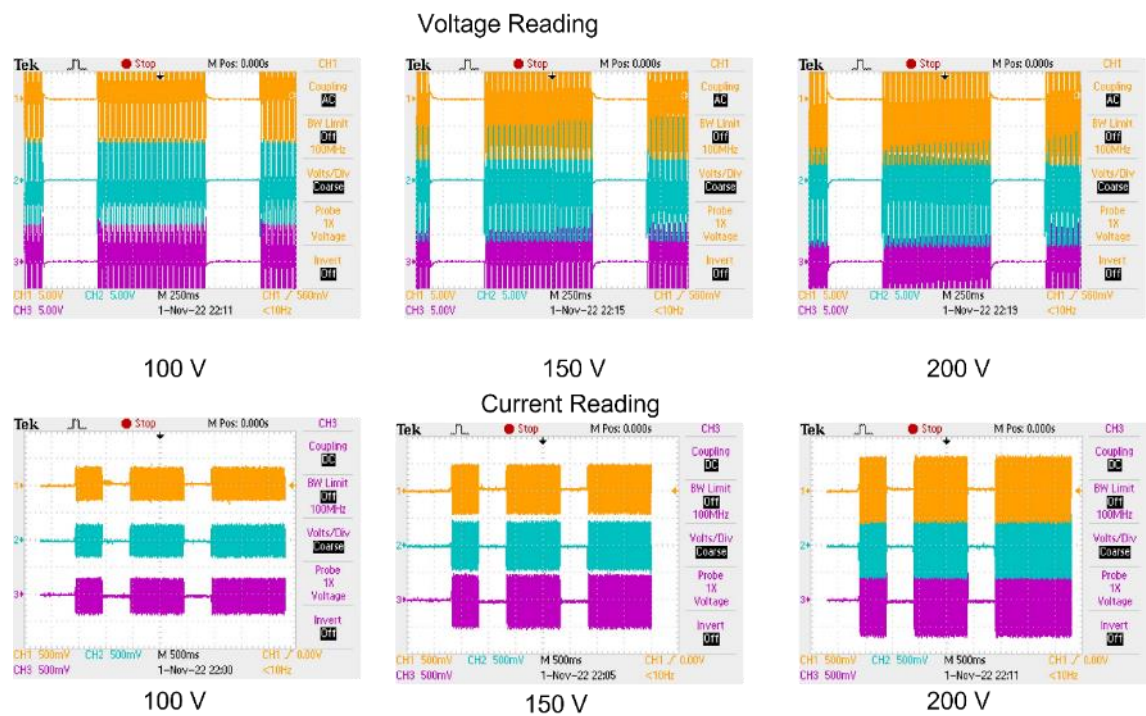
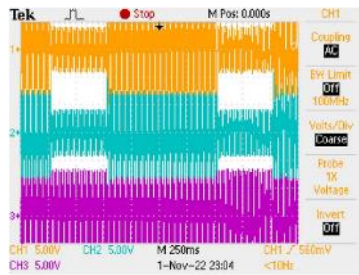
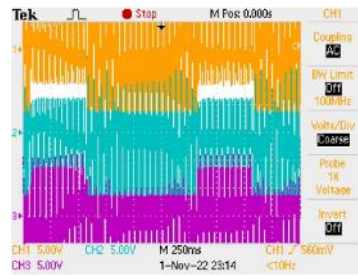


圖 111 發生三相平衡故障時，電阻負載的電壓與電流讀數(BESS-PQ 模式)

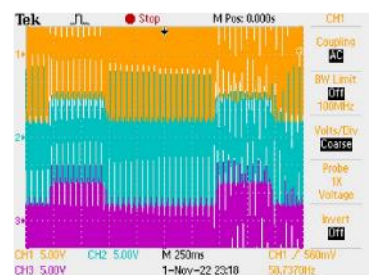
Voltage Reading



100 V

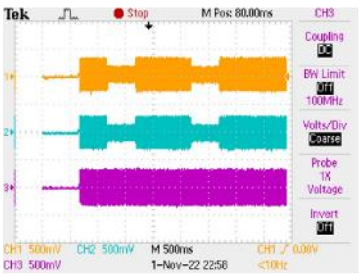


150 V

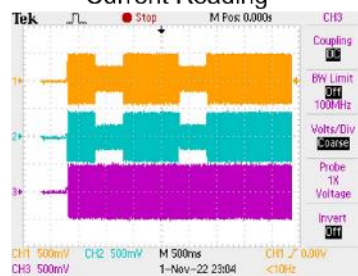


200 V

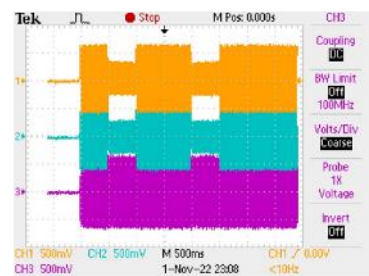
Current Reading



100 V



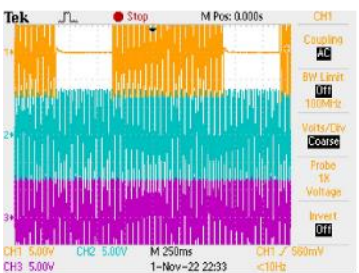
150 V



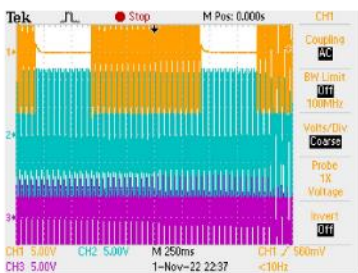
200 V

圖 112 發生相對相故障時，電阻負載的電壓與電流讀數(BESS-PQ 模式)

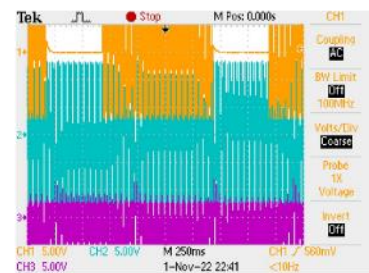
Voltage Reading



100 V

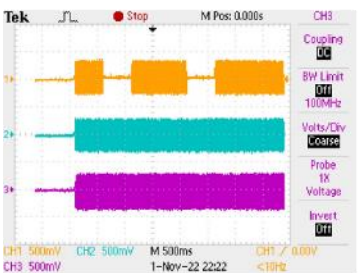


150 V

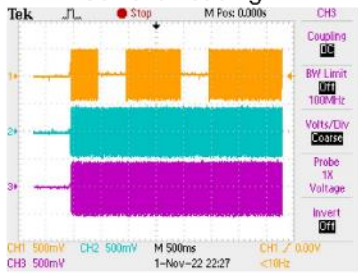


200 V

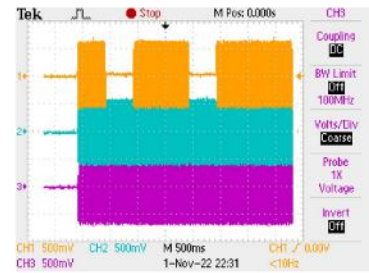
Current Reading



100 V



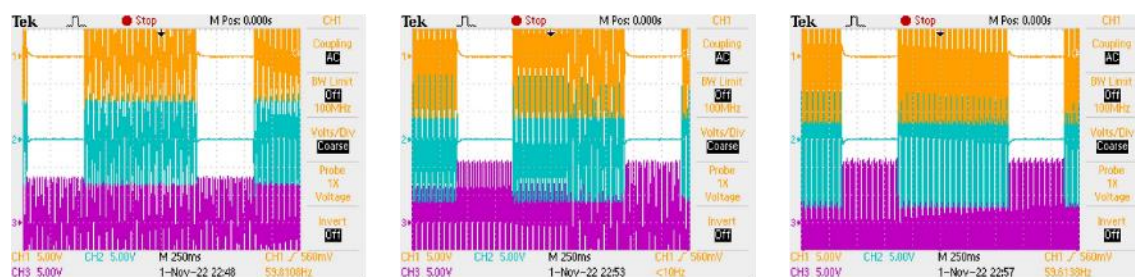
150 V



200 V

圖 113 發生單相接地故障時，電阻負載的電壓與電流讀數(BESS-PQ 模式)

Voltage Reading

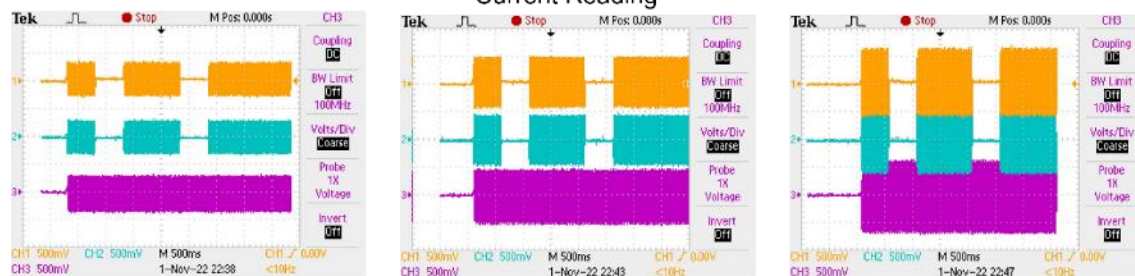


100 V

150 V

200 V

Current Reading



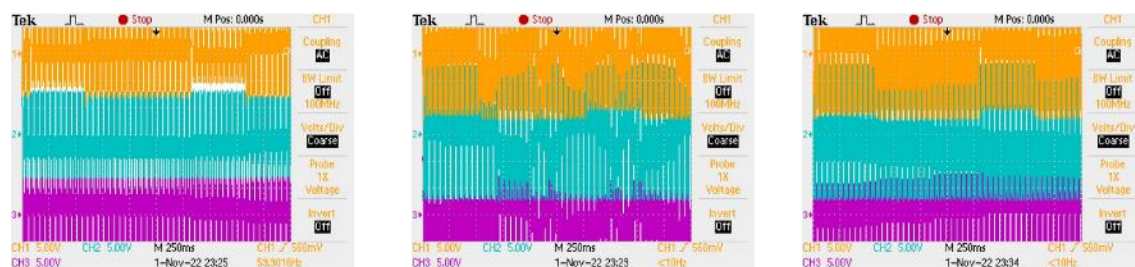
100 V

150 V

200 V

圖 114 發生雙相接地故障時，電阻負載的電壓與電流讀數(BESS-PQ 模式)

Voltage Reading

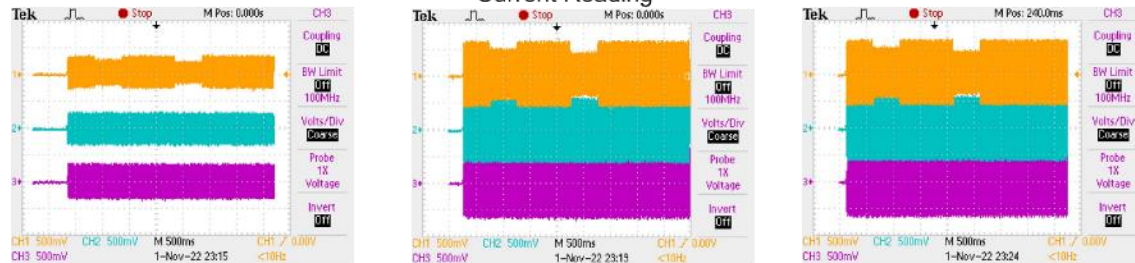


100 V

150 V

200 V

Current Reading



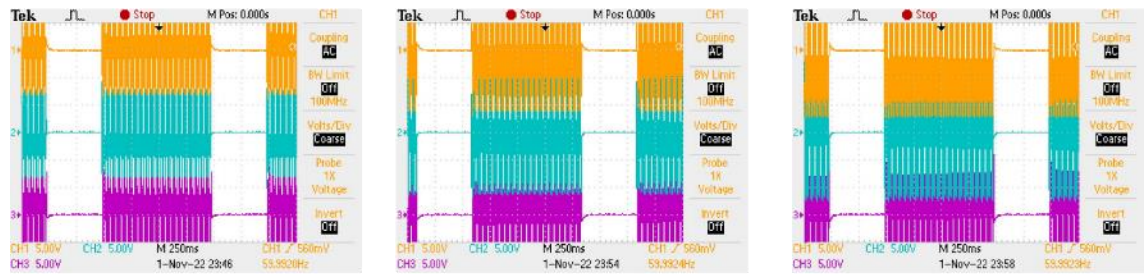
100 V

150 V

200 V

圖 115 發生單相高阻抗故障時，電阻負載的電壓與電流讀數(BESS-PQ 模式)

Voltage Reading

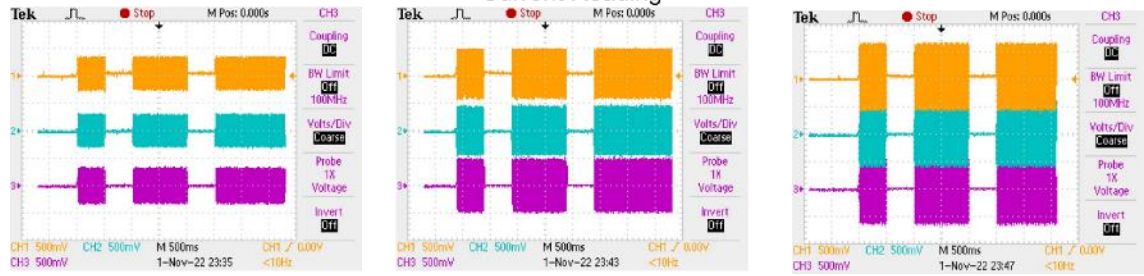


100 V

150 V

200 V

Current Reading



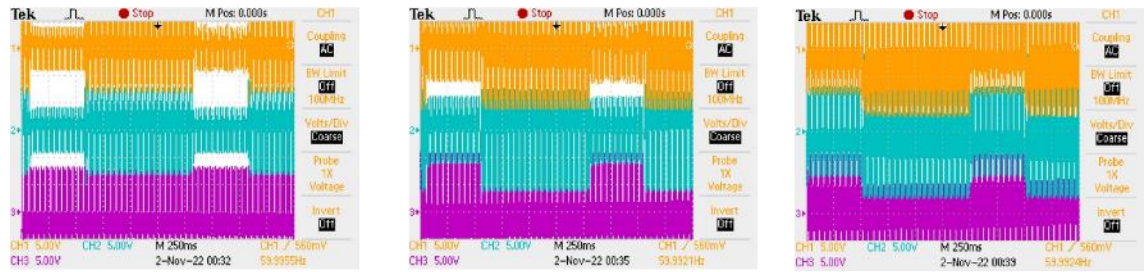
100 V

150 V

200 V

圖 116 發生三相平衡故障時，電阻負載的電壓與電流讀數(PV-PQ 模式)

Voltage Reading

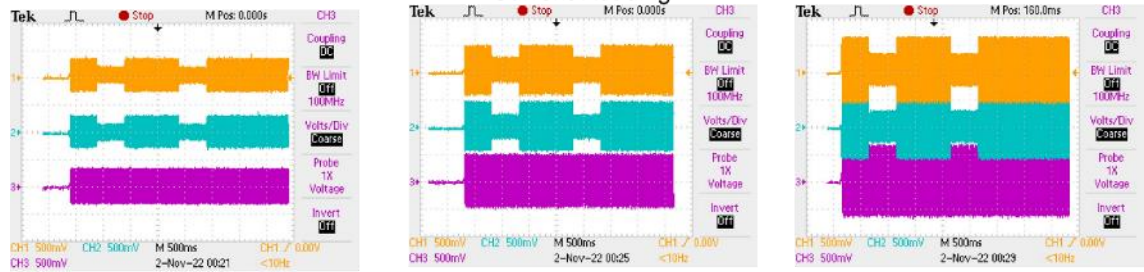


100 V

150 V

200 V

Current Reading



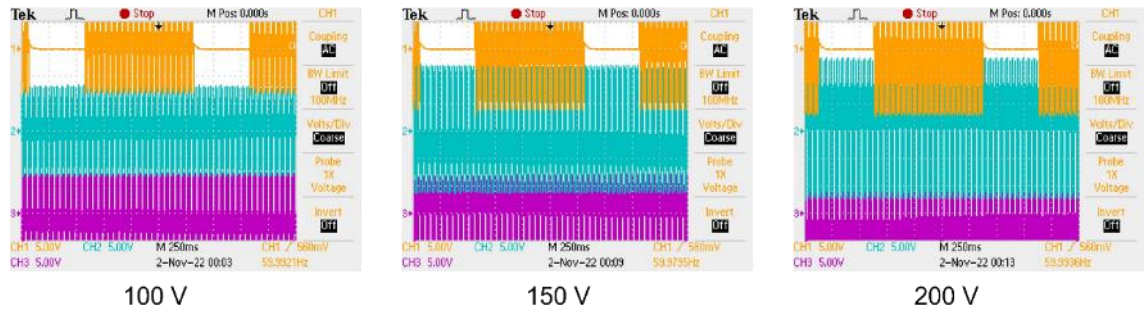
100 V

150 V

200 V

圖 117 發生相對相故障時，電阻負載的電壓與電流讀數(PV-PQ 模式)

Voltage Reading



Current Reading

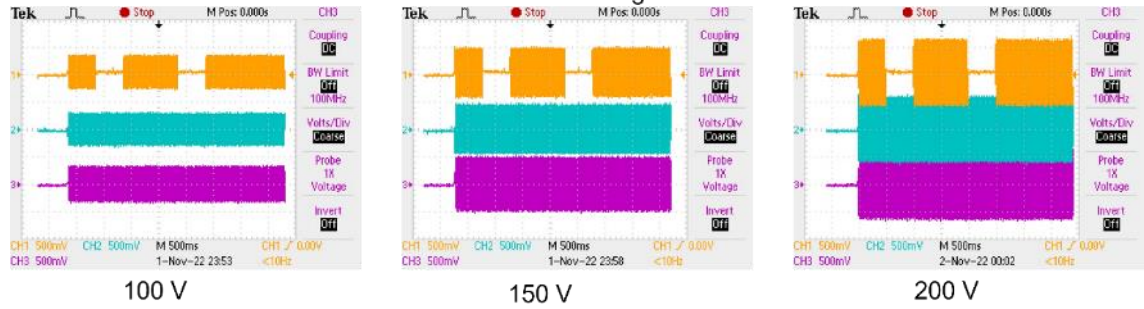
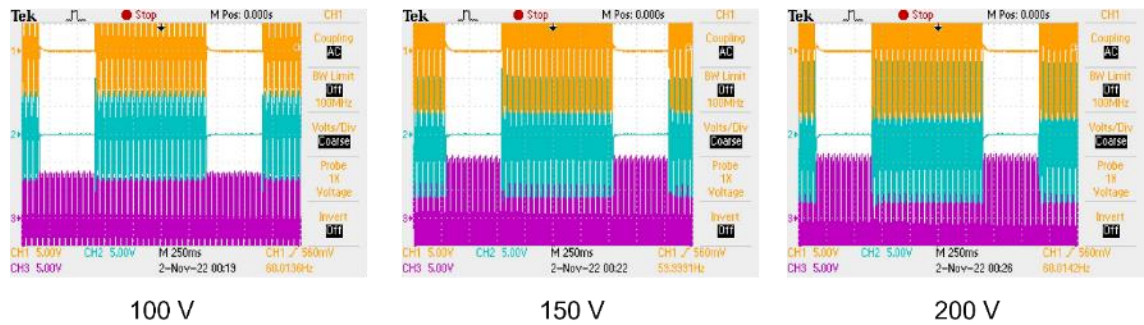


圖 118 發生單相接地故障時，電阻負載的電壓與電流讀數(PV-PQ 模式)

Voltage Reading



Current Reading

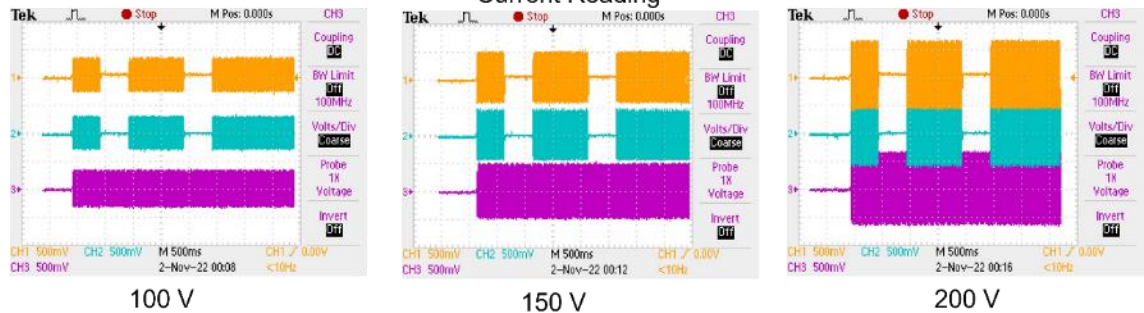


圖 119 發生雙相接地故障時，電阻負載的電壓與電流讀數(PV-PQ 模式)

Voltage Reading

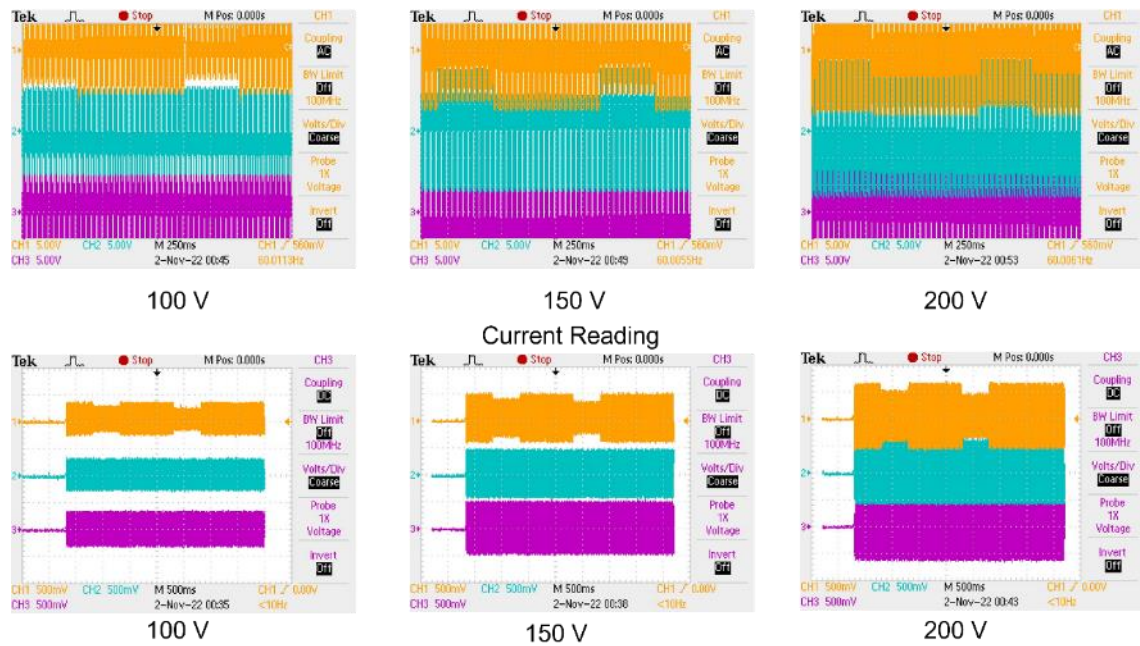


圖 120 發生單相高阻抗故障時，電阻負載的電壓與電流讀數(PV-PQ 模式)

如圖 111 至圖 120 所示，當故障條件發生時，負載中的電流與電壓響應與母線 1 與母線 2 的響應相似。每個圖中的電流響應隨著在三相電源中增加電壓而增加。每 25kV 電壓讀數縮放至 1V，而電流讀數每 2kA 縮放至 1V。

柒、結論

本研究為基於逆變器的分散式電源(IBDG)，其具有不同的控制模式，這些方案連接在配電系統上產生不同的故障狀況，研究結果發現如下：

1. 針對不同的控制模式，導出一般解決平衡與不平衡故障的解析方法，並使用 MATLAB Simulink 進行驗證。
2. 所提方法結果與 Simulink 模型接近，顯示導出的數學公式可用於解

決具不同控制模式的 IBDG (BESS 與 PV)的配電系統短路分析，如 MPPT、PQ、VQ 與 Pf 的控制方案。

3. 驗證具 IBDG 的配電系統其每個母線的電壓與電流響應相似。
4. 使用 OPAL-RT eMegasim 進行即時動態模型時域模擬以驗證具 IBDG 靜態模型的穩態結果。
5. 功率硬體迴圈模擬實驗用於觀察電阻負載在不同故障條件與不同電壓水平下的行為。

捌、參考文獻

- [1] S. Y. Derakhshandeh, M. E. H. Golshan and M. A. Masoum, "Profit-based unit commitment with security constraints and fair allocation of cost saving in industrial microgrids," *IET Science, Measurement and Technology*, pp. 315 - 325, 2013.
- [2] X. Kong, D. Liu, C. Wang, F. Sun and S. Li, "Optimal operation strategy for interconnected microgrids in market environment considering uncertainty," *Applied Energy*, vol. 275, p. 115336, 2020.
- [3] Y.-Y. Hong and L. A. P. Magararu, "Techno-economic analysis of Taiwan' s new energy policy for 2025," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, p. 101307, 2021.
- [4] N. Nimpitiwan, G. T. Heydt, R. Ayyanar and S. Suryanarayanan, "Fault Current Contribution From Synchronous Machine and Inverter Based Distributed Generators," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 22, no. 1, pp. 634 - 641, January 2007.
- [5] D. V. Tu, S. Chaitusaney and A. Yokoyama, "Maximum-Allowable Distributed Generation Considering Fault Ride-Through Requirement And Reach Reduction of Utility Relay," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 29, no. 2, pp. 534 - 541, April 2014.
- [6] X. LIU, "Fault Current Negative Contribution Method for Inverter-Based Distributed Generators Under Grid Unbalanced Fault," *IEEE Access*, vol. 8, p. 220807, 2020.
- [7] N. Zhou, J. Wu and Q. Wang, "Three-Phase Short-Circuit Current Calculation of Power Systems with High Penetration of VSC-Based

Renewable Energy," *Energies*, vol. 11, no. 537, 2018.

- [8] I. Kim, "Short-Circuit Analysis Models for Unbalanced Inverter-Based Distributed Generation Sources and Loads," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 34, no. 5, pp. 3515 – 3526, September 2019.
- [9] B. Mahamedi, J. G. Zhu, M. Eskandari, L. Li and A. Mehrizi-Sani, "Analysis of Fault Response of Inverter-Interfaced Distributed Generators in Sequence Networks," in *2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, Portland, OR, USA, 2018.
- [10] C. Mozina, "Impact of green power inverter-based distributed generation on distribution systems," in *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, College Station, TX, USA, 2014.
- [11] N. Rajaei and M. M. A. Salama, "Management of Fault Current Contribution of Synchronous DGs Using Inverter-Based DGs," *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, vol. 6, no. 6, pp. 3073 – 3081, November 2015.
- [12] M. Basu, V. R. Mahindara, J. Kim and E. Muljadi, "Effect of high penetrated reactive power support based Inverter-Based-Resources on the power stability of microgrid distribution system during faults," in *2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Detroit, MI, USA, 2020.
- [13] J. Lijun, J. Miaomiao and Y. Guangyao, "Fault Analysis of Microgrid and Adaptive Distance Protection based on Complex Wavelet Transform," in *2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition*, Shanghai, China, 2014.
- [14] J. Y. R. Wong, C. Tan, A. H. Abu Bakar and H. S. Che, "Selectivity Problem in Adaptive Overcurrent Protection for Microgrid with Inverter-Based Distributed Generators (IBDG): Theoretical Investigation and HIL Verification," *IEEE Transactions on Power Delivery (Early Access)*, 2021.
- [15] B. Mahamedi, M. Eskandari, J. E. Fletcher and J. Zhu, "Sequence-Based Control Strategy With Current Limiting for the Fault Ride-Through of Inverter-Interfaced Distributed Generators," *IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY*, vol. 11, no. 1, pp. 165 – 174, 2020.
- [16] M. A. Haj-ahmed and M. S. Illindala, "The Influence of Inverter-Based DGs and Their Controllers on Distribution Network Protection," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 50, no. 4, pp. 2928 – 2937, 2014.

- [17] N. Rajaei, M. H. Ahmed, M. M. A. Salama and R. K. Varma, "Fault Current Management Using Inverter-Based Distributed Generators in Smart Grids," *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, vol. 5, no. 5, pp. 2183 – 2193, 2014.
- [18] S. F. Zarei and M. Parniani, "A Comprehensive Digital Protection Scheme for Low-Voltage Microgrids with Inverter-Based and Conventional Distributed Generations," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 32, no. 1, pp. 441 – 452, 2017.
- [19] N. Boonyapakdee, A. Sangswang and M. Konghirun, "Modified current phase angle calculation of inverter-based DGs for eliminating the effects of fault current contribution from synchronous DGs in smart grid," in *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Chiba, Japan, 2016.
- [20] D.-E. Kim, N. Cho and S.-K. Yang, "Static Equivalent Model of Inverter-based Distributed Energy Resource for Fault Analysis of Power Distribution Grid," *KEPCO Journal on Electric Power and Energy*, vol. 2, no. 4, pp. 569 – 575, 2016.
- [21] Z. Shuai, C. Shen, X. Yin, X. Liu and Z. J. Shen, "Fault Analysis of Inverter-Interfaced Distributed Generators With Different Control Schemes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 3, pp. 1223 – 1235, June 2018.
- [22] C. Raj, D. Gaonkar and J. M. Guerrero, "Improved P-f/Q-V and P-V/Q-f droop controllers for parallel distributed generation inverters in AC microgrid," *Sustainable Cities and Society*, vol. 41, pp. 421 – 442, 2018.
- [23] Schneider Electric, "Calculation of short-circuit currents Technical notebook | Schneider Electric," 9 January 2005. [Online]. Available: <https://www.se.com/ww/en/download/document/ECT158/>. [Accessed 14 May 2022].
- [24] A. Emanuel, D. Cyganski, J. Orr, S. Shiller and E. Gulachenski, "High Impedance Fault Arcing on Sandy Soil in 15 kV Distribution Feeders: Contributions to the Evaluation of the Low Frequency Spectrum," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 2, pp. 676 – 686, April 1990.