行政院原子能委員會核能研究所

委託研究計畫研究報告(期末報告)

含分散式電源之饋線節點狀態分析研究

Studies on States of Nodes in Feeders Involving with Distributed Generations

受委託機關(構)：中原大學　電機系

計畫主持人：洪穎怡教授

聯絡電話：03-2652500

E-mail address：yyhong@ee.cycu.edu.tw

核研所聯絡人員：王慎思

目錄

摘要.....2

壹、計畫緣起與目的.....4

一、 研究背景.....4

二、 研究目的.....6

貳、研究方法與過程.....7

一、 電力潮流計算與現場資料量測之狀態估測比對.....7

二、 含分散式電源配電網故障電流模擬.....13

三、 探討含分散式電源之配電系統保護方式與解析.....16

四、 DG 接入配電網不同位置時對配電網過電流保護之解析 20

五、 基於提前計算整定值的自我調整電流速斷保護.....32

六、 不同節點狀態下，動態保護協調案例分析.....37

七、 探討自我調整電流速斷保護模擬.....43

參、結論.....62

摘要

在極端氣候及能源耗竭的議題不斷被提出，低碳與能源自主已成為國際的發展趨勢，永續環保的再生能源逐漸地成為電力能源發展的新主力。政府設定 2025 年再生能源推廣目標為 27.623GW，其中太陽光電裝置容量 20GW，離岸及陸域風電裝置容量分別為 5.7GW 及 1.2GW，占發電總量的 20%。

而台電公司擁有發輸配電系統，為加速再生能源併網，台電於 107~108 年度連續推動 12 項友善併網措施，至 109 年 11 月底太陽光電累計併網量已達 6.5GW，積極推展綠能已見成效。

分散式電源（Distributed Generation，DG）是具發展潛力及技術成熟的小型發電系統，相較於傳統火力、水力及核能發電方式規模小，較易設置。在產生高效益的同時，也給電網帶來了運轉的問題，例如受設置地點及天候影響，日/夜發電時間及發電不確定且不易掌控。DG 接入配電網後在配電網線路發生短路故障時，其故障電流的大小發生了潮流的變化，所以各線路電流保護裝置可能發生誤動作的問題；而 DG 接入位置、額定功率輸出的不同，同樣會給配電網帶來不同程度的影響。本計畫針對含分散式電源之配電系統進行保護方式解析，探討具逆變器分散式電源接入對配電網狀態估測的影響，並探討自我調整電流速斷保護模擬。

本報告為期末報告，內容包含探討具逆變器分散式電源接入對配電網狀態估測的影響、探討含分散式電源之配電系統保護方式與解析，最後探討自我調整電流速斷保護模擬。

關鍵詞：分散式電源、配電網、反時限過電流保護、自我調整電流速斷保護

Abstract

The issue of extreme climate and energy consumption is becoming more and more important. Zero carbon and autonomous energy management have become the development trend of various countries. Sustainable and renewable energy has gradually become the key to the development of electric energy.

The Taiwanese government has set a target of 27.623GW for renewable energy generation in 2025. The target capacity for solar photovoltaic installations is 20GW, and the capacity of offshore and onshore wind power installations is 5.7GW and 1.2GW respectively. It will account for 20% of the total power generation. Taipower promoted 12 friendly grid-connected measures from 2018 to 2019. By the end of November 2020, the total capacity of grid-connected solar energy has reached 6.5GW, which means the promotion of green energy succeeded.

Distributed generation (DG) is a small-scale potential power generation system. Compared with traditional thermal, hydraulic and nuclear power generations, DG is small-scale and easier to build. DGs have higher efficiency, but they also lead to operational problems to the power grid. These problems include location, weather effects, day/night power generation time and power generation, which is uncertain and difficult to control. When connected to the grid, a short-circuit fault caused by DGs may occur in the distribution network. The presence of fault currents can lead to a change in the power flow direction. Thus, the response of the current protection device of each line may be malfunction.

The sites as well as the rated power output of a DG in the power grid may lead to different effects on the distribution network. This project analyzes protection methods involving DGs, and adaptive fast-open protection in the distribution network.

This is the final report. It includes state estimation related to distribution systems with DGs, protection schemes for distribution systems with DG as well as adaptive current protection.

Keywords: Distributed generation, distributed network, inverse time overcurrent protection, adaptive current protection

壹、 計畫緣起與目的

一、 研究背景

推動再生能源發展是我國能源轉型至關重要之一環。我國能源政策規劃114年再生能源發電占20%之目標，其中太陽光電為最重要之項目之一。經統計太陽光電發電系統總裝置容量累計至109年11月底已併網達6.5GW；另於110年5月19日當天，太陽光電發電量在早上的10:30發電量來到了3GW，超越了核能的2.76GW。

政府為再加速推動再生能源，於108年5月1日再修正「再生能源發展條例」，規範綠電交易、公家機關及用電大户要設置綠電等多項措施；108年初Google公司宣布向臺南太陽能電廠，自願性採購10MW綠電，作為其台灣資料中心營運使用，此係Google公司第一次在亞洲所完成之再生能源採購計畫。顯見太陽光電不僅對國內實際供電上，已產生具體效果，臺灣在綠能發展之長期努力，也已得到國際認同。

分散式電源早在20世紀70年代時，就已經在美國提出。通常來說，分散式電源普遍被定義為：相對於傳統的集中式供電不同，是一些分散的中小型發電單元，一般來說併入中低壓配電網或者以直接分佈在負載或用戶周圍的形式直接向負載或用戶提供電能，並且具有環境友好的特點，裝機容量一般較小。相比於常規的大電網提供電能的模式，利用分散式電源系統提供電能主要有以下幾個優點：（1）經濟性好。分散式電源由於其容量小，規模小，佔地面積小，便於安裝運轉，所以本體造價低。而且，分散式電源併入中低壓配電網，也能降低運轉時線路損耗，減小發電廠、電力線路、配電站及變電站等的大量投資。（2）環保性好。利用無污染的太陽能、風能等，能有效地降低有害顆粒和污染性氣體的排放，能有效減少電磁對動植物危害，可減少新建線路實現保護稀缺土地的資源及植被樹木。而且分散式發電可以與冷熱聯產相結合，透過回收廢熱來實現製熱或者製冷，能更有效地提

高能源的利用。（3）安全可靠性好。分散式電源單機容量小，但卻數量眾多，而且分散式電源彼此之間相互獨立，所以同時發生各類故障的概率極小，不容易造成發生大面積停電的情況。即使發生大面積停電事故，但得益於分散式電源使用的靈活性能、啟動簡便的特點可作為備用電源，為重要負載提供不間斷電能的服務。（4）分散式電源啟動和停機切換速度迅速，具有很好的調峰能力。

總結歸納，可以概括出分散式電源均具有下述的 4 個特點：（1）利用分散式能源發電，並直接向用戶供電就地消納，一般不會遠距離傳輸。（2）裝機容量均較小，一般都在 10MW 左右例如：美國、丹麥等因家規定分佈電源的單機容量為 10MW，紐西蘭則規定單個分散式電源可以併入配電網中容量為 5MW，英國由於分散式電源可以併入較高電壓等級的配電網中，因此單個分散式電源可以併入的容量較大為 100MW。（3）分散式電源通常在中壓或低壓的配電網中併網運轉，但是不同國家關於中低壓配電網的電壓有著自己不同的標準，因此分散式電源併網的電壓也各有差異。大多數國家一般將中低壓配電網的電壓等級上限設為 30kV，然而英國將中低壓配電網的電壓等級上限設為 66kV。（4）發電的資源主要為可再生能源、天然氣以及綜合利用的資源。近年，分散式電源的探索與推廣應用取得了長足的進步，美國作為世界上最早探索與利用分散式電源的國家之一，其在分散式電源設備研發、製造等領域均在全球市場中佔有重要地位。同樣，歐洲各國也在積極探索分散式電源的發展與應用，推出了許多關於促進分散式電源發展的激勵政策。其中丹麥國家分散式電源獲得高速的發展並卓越成效，已被國際上當作節能與環保的典範。日本作為資源匱乏的國家，在 2003 年日本頒布了關於促進分散式電源快速發展的有關法律、政策，日本分散式電源發展起步早，並且種類廣，尤其在太陽能發電領域已經取得了世界矚目的成果。

分散式電源併入配電網中使配電網由單電源提供電能的輻射狀結構網路，變為多電源提供電能的系統，由此給配電網帶來最嚴峻的挑戰之一是配電網的安全保護問題。大量分散式電源併入使得配電網結構發生改變，從而引發了配電網的保護問題。比較常見的一種保護方案是在配電網出現故障後，及時將分散式電源從配電網中退出，使配電網恢復到原來的結構，因此原有保護方案可以不改變就能切除故障。配電網故障大多數都是瞬時故障，應用該方案將會產生分散式電源較為頻繁地接入和切除的情況，既不利於配電網的穩定運轉，也會縮短分散式電源的使用壽命。

二、　研究目的

本計畫主要探討含逆變器 DG 的配電網中，不同位置出現故障的情況，各線路電流保護裝置可能發生誤動作的問題，提出了含逆變器 DG 的配電網電流保護的改進整定方案。本計畫首先在 MATLAB/Simulink 或 EMTP 平台上搭建併網光伏系統的模擬模型，確保光伏陣列、MPPT、逆變等功能模塊能夠實現；其次，研究光伏系統併網對於配電網故障特性和保護的影響，利用所建立的光伏併網模型進行模擬，觀察光伏系統實功虛功和接地電阻與故障電流的關係。

貳、研究方法與過程

一、 電力潮流計算與現場資料量測之狀態估測比對

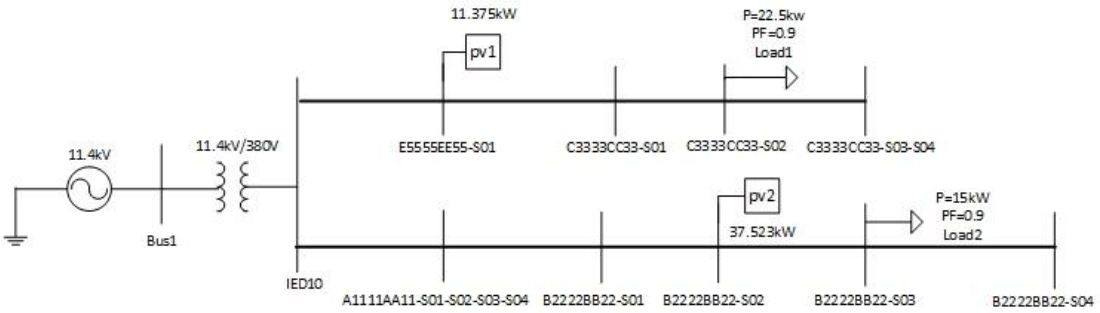
(1)核研所配電網系統

探討具逆變器分散式電源接入對配電網狀態估測的影響，以核研所提供所內具 PV 的兩饋線微電網為例，比對 OpenDSS 與實際量測值。首先將調整電壓源電壓，使母線 IED10 的電壓接近實際量測值(誤差在 0.364%以下)，並考慮 PV 虛功量測值。

配電網系統包含兩個併網的太陽光伏陣列，其中一個太陽能功率為 11.375kW，另一個為 37.523kW，如圖(一)所示。而在實際測量此配電網時，太陽光伏有虛功產生，11.375kW 的太陽光伏產生虛功為 1.4983kVAR，37.523kW 的太陽光伏產生虛功為 3.1243kVAR。

當再生能源發電系統運轉功率因數未維持在單位功因時，會使配電線路電壓有較大的變動(上升)，因此針對了兩種情況進行模擬。從表 1 與表 2 比較，可發現當太陽光伏併網產生虛功時，配電網因受虛功影響，使得在母線上測量到的電壓值皆提高。

以表 2 為例，在系統上半部饋線： 具 PV(11.375kW)的母線電壓的誤差在 4.369~4.852%，具負載(22.5kW)的母線電壓誤差在 4.350%。在系統下半部饋線： 具 PV(37.532kW)的母線電壓的誤差在 17.627~18.115%，具負載(15kW)的母線電壓誤差在 17.627~18.115%。



▲圖(一) 核研所配電網系統單線圖

表 1 核研所配電網各節點電壓值（併網太陽能產生虛功設為 0）

Bus	Node	V_{LN}(V)	Angle	pu	量測值(V)	誤差%
IE10	1	217.59	0.0	0.992	217.5	0.041
	2	217.59	-120.0	0.992	216.8	0.364
	3	217.59	120.0	0.992	217.5	0.041
E5555EE55-S01	1	224.7	3.6	1.024	217.0	3.548
	2	224.7	-116.4	1.024	216.0	4.028
	3	224.7	123.6	1.024	217.0	3.548
C3333CC33-S01	1	224.66	3.6	1.024	217.0	3.530
	2	224.66	-116.4	1.024	217.0	3.530
	3	224.66	123.6	1.024	217.0	3.530
C3333CC33-S02	1	224.62	3.6	1.024	-	-
	2	224.62	-116.4	1.024	-	-
	3	224.62	123.6	1.024	-	-
C3333CC33-S03	1	224.66	3.6	1.024	-	-
	2	224.66	-116.4	1.024	-	-
	3	224.66	123.6	1.024	-	-
C3333CC33-S04	1	224.67	3.6	1.024	217.0	3.535
	2	224.67	-116.4	1.024	217.0	3.535
	3	224.67	123.6	1.024	217.9	3.107
A1111AA11-S01	1	210.89	7.8	0.961	217.9	3.217
	2	210.89	-112.2	0.961	217.0	2.816
	3	210.89	127.8	0.961	217.0	2.816
A1111AA11-S02	1	210.89	7.8	0.961	-	-
	2	210.89	-112.2	0.961	-	-
	3	210.89	127.8	0.961	-	-
A1111AA11-S03	1	210.89	7.8	0.961	-	-
	2	210.89	-112.2	0.961	-	-
	3	210.89	127.8	0.961	-	-
A1111AA11-S04	1	211.31	26.6	0.963	217.9	3.024
	2	211.31	-93.4	0.963	217.0	2.622
	3	211.31	146.6	0.969	217.9	3.024
B2222BB22-S01	1	238.43	46.0	1.087	217.9	9.422
	2	238.43	-74.0	1.087	217.0	9.876
	3	238.43	166.0	1.087	217.9	9.422
B2222BB22-S02	1	238.43	46.0	1.087	-	-
	2	238.43	-74.0	1.087	-	-

	3	238.43	166.0	1.087	-	-
B2222BB22-S03	1	238.43	46.0	1.087	-	-
	2	238.43	-74.0	1.087	-	-
	3	238.43	166.0	1.087	-	-
B2222BB22-S04	1	238.43	46.0	1.087	217.9	9.422
	2	238.43	-74.0	1.087	217.0	9.876
	3	238.43	166.0	1.087	217.9	9.422

(空白處為未取得系統實際測量值)

表 2 核研所配電網各節點電壓值（併網太陽能產生虛功依量測值來模擬）

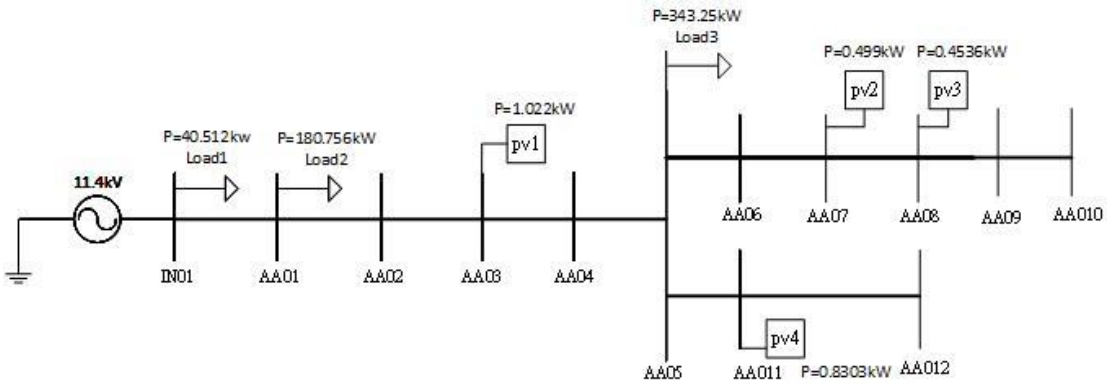
Bus	Node	V_{LN}(V)	Angle	pu	量測值(V)	誤差%
IE10	1	217.59	0.0	0.992	217.5	0.041
	2	217.59	-120.0	0.992	216.8	0.364
	3	217.59	120.0	0.992	217.5	0.041
E5555EE55-S01	1	226.48	3.3	1.032	217.0	4.369
	2	226.48	-116.7	1.032	216.0	4.852
	3	226.48	123.3	1.032	217.0	4.369
C3333CC33-S01	1	226.44	3.3	1.032	217.0	4.350
	2	226.44	-116.7	1.032	217.0	4.350
	3	226.44	123.3	1.032	217.0	4.350
C3333CC33-S02	1	226.44	3.3	1.032	-	-
	2	226.44	-116.7	1.032	-	-
	3	226.44	123.3	1.032	-	-
C3333CC33-S03	1	226.44	3.3	1.032	-	-
	2	226.44	-116.7	1.032	-	-
	3	226.44	123.3	1.032	-	-
C3333CC33-S04	1	226.44	3.3	1.032	217.0	4.350
	2	226.44	-116.7	1.032	217.0	4.350
	3	226.44	123.3	1.032	217.9	3.919
A1111AA11-S01	1	213.23	8.3	0.972	217.9	2.143
	2	213.23	-111.7	0.972	217.0	1.737
	3	213.23	128.3	0.972	217.0	1.737
A1111AA11-S02	1	213.23	8.3	0.972	-	-
	2	213.23	-111.7	0.972	-	-
	3	213.23	128.3	0.972	-	-
A1111AA11-S03	1	213.23	8.3	0.972	-	-

	2	213.23	-111.7	0.972	-	-
	3	213.23	128.3	0.972	-	-
A1111AA11-S04	1	220.61	27.3	1.000	217.9	1.244
	2	220.61	-92.6	1.000	217.0	1.664
	3	220.61	147.4	1.000	217.9	1.244
B2222BB22-S01	1	256.31	46.0	1.168	217.9	17.627
	2	256.31	-74.0	1.168	217.0	18.115
	3	256.31	166.0	1.168	217.9	17.627
B2222BB22-S02	1	256.31	46.0	1.168	-	-
	2	256.31	-74.0	1.168	-	-
	3	256.31	166.0	1.168	-	-
B2222BB22-S03	1	256.31	46.0	1.168	-	-
	2	256.31	-74.0	1.168	-	-
	3	256.31	166.0	1.168	-	-
B2222BB22-S04	1	256.31	46.0	1.168	217.9	17.627
	2	256.31	-74.0	1.168	217.0	18.115
	3	256.31	166.0	1.168	217.9	17.627

(空白處為未取得系統實際測量值)

(2)台電饋線架構

本計畫同時模擬了台電饋線系統進行具逆變器分散式電源接入對配電網狀態估測的影響，此段饋線包含四個併網的太陽光伏陣列，太陽能功率分別為 1.022kW、0.499kW、0.4536kW 及 0.8303kW，如圖(二)所示。透過比對 OpenDSS 與實際量測值可觀察，整體架構平均誤差約為 0.62%。而 IN01 母線上因具負載(40.512kW)，此處誤差 1.2481%，同理 AA05 母線具負載(343.25kW)，誤差為 1.36%。AA012 處也因受 PV(0.8303kW)併網影響，模擬的電壓較測量的電壓高 1.2%。



▲圖(二) 台電系統單線圖

表 3 台電系統各節點電壓值

Bus	Node	VLN(kV)	Angle	pu	量測值(kV)	誤差%
IN01	1	6.733	0.0	1.023	6.73	0.0446
	2	6.733	-120.0	1.023	6.65	1.2481
	3	6.733	120.0	1.023	6.79	0.8395
AA01	1	6.733	0.0	1.023	-	-
	2	6.733	-120.0	1.023	-	-
	3	6.733	120.0	1.023	-	-
AA02	1	6.733	0.0	1.023	-	-
	2	6.733	-120.0	1.023	-	-
	3	6.733	120.0	1.023	-	-
AA03	1	6.730	-0.1	1.023	-	-
	2	6.730	-120.1	1.023	-	-

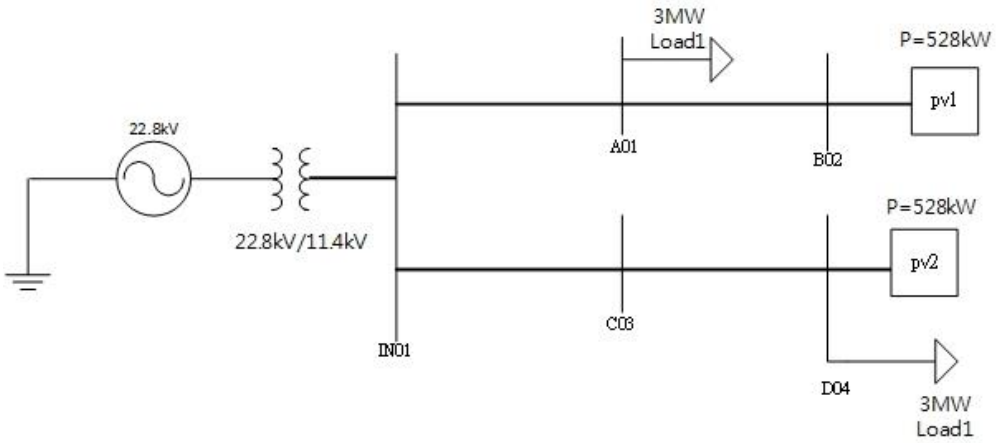
	3	6.730	119.9	1.023	-	-
AA04	1	6.730	-0.1	1.023	-	-
	2	6.730	-120.1	1.023	-	-
	3	6.730	119.9	1.023	-	-
AA05	1	6.730	-0.1	1.023	6.64	1.36
	2	6.730	-120.1	1.023	6.67	0.90
	3	6.730	119.9	1.023	6.77	0.59
AA06	1	6.730	-0.1	1.023	-	-
	2	6.730	-120.1	1.023	-	-
	3	6.730	119.9	1.023	-	-
AA07	1	6.730	-0.1	1.023	-	-
	2	6.730	-120.1	1.023	-	-
	3	6.730	119.9	1.023	-	-
AA08	1	6.730	-0.1	1.023	-	-
	2	6.730	-120.1	1.023	-	-
	3	6.730	119.9	1.023	-	-
AA09	1	6.730	-0.1	1.023	-	-
	2	6.730	-120.1	1.023	-	-
	3	6.730	119.9	1.023	-	-
AA10	1	6.730	-0.1	1.023	6.72	0.15
	2	6.730	-120.1	1.023	6.74	0.15
	3	6.730	119.9	1.023	6.71	0.30
AA11	1	6.730	-0.1	1.023	-	-
	2	6.730	-120.1	1.023	-	-
	3	6.730	119.9	1.023	-	-
AA12	1	6.730	-0.1	1.023	6.65	1.20
	2	6.730	-120.1	1.023	6.69	0.60
	3	6.730	119.9	1.023	6.74	0.15

(空白處為未取得系統實際測量值)

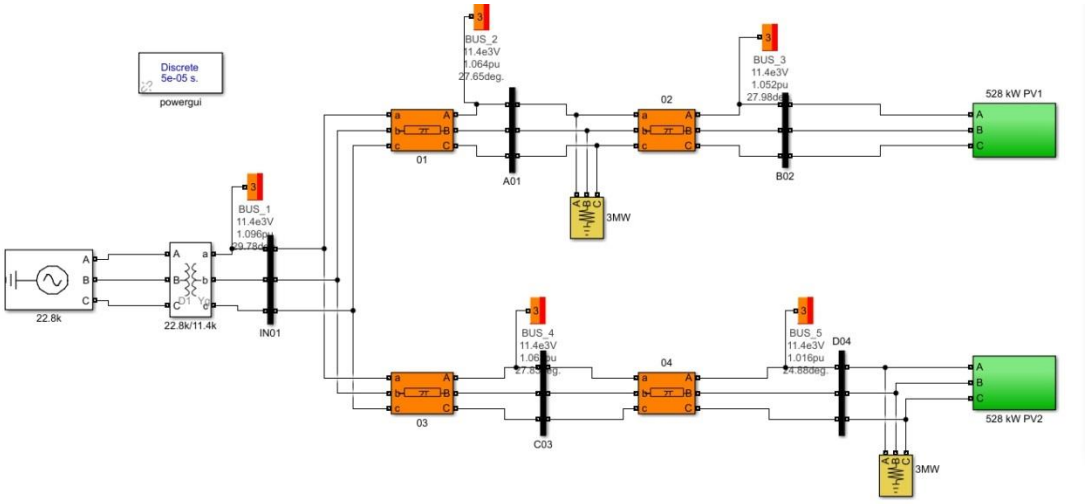
二、 含分散式電源配電網故障電流模擬

含分散式電源配電網發電具有能效高、污染小、可靠性高、安裝地點靈活等優點。然而分散式再生能源發電具有間歇性與不穩定性，若區域再生能源占比逐漸提升，將衝擊到電力系統區域運轉的穩定性。MATLAB/Simulink 為學術界廣為常用的電力系統時域分析軟體，而 EMTP-RV 為現今最具權威的電磁暫態分析軟體並結合再生能源模塊。本計畫將利用 MATLAB/Simulink 及 EMTP-RV 相互驗證故障電流的計算大小，並比較兩個軟體建模可能產生的差異。

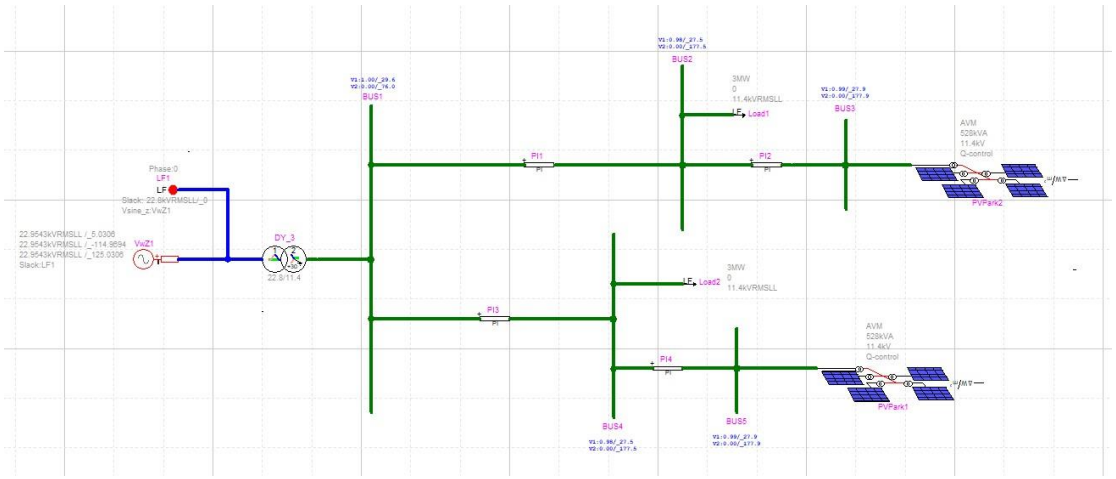
搭建 11.4kV 配電網系統，此系統包含兩個太陽光伏，皆為 528kVA，於系統母線 B02 與母線 D04 處，而在 A01、D04 母線上各有一負載(3MW)(如圖三)。圖四與圖五分別為在 Simulink 與 EMTP 中含分散式電源配電網模擬電路圖。為使比對 Simulink 與 EMTP 兩系統模擬出來的故障電流準確度提高，這裡將母線 IED10 的電壓在兩套軟體相同(誤差 0%)，各母線電壓誤差如表 4。



▲圖(三) 含分散式電源配電網模擬系統



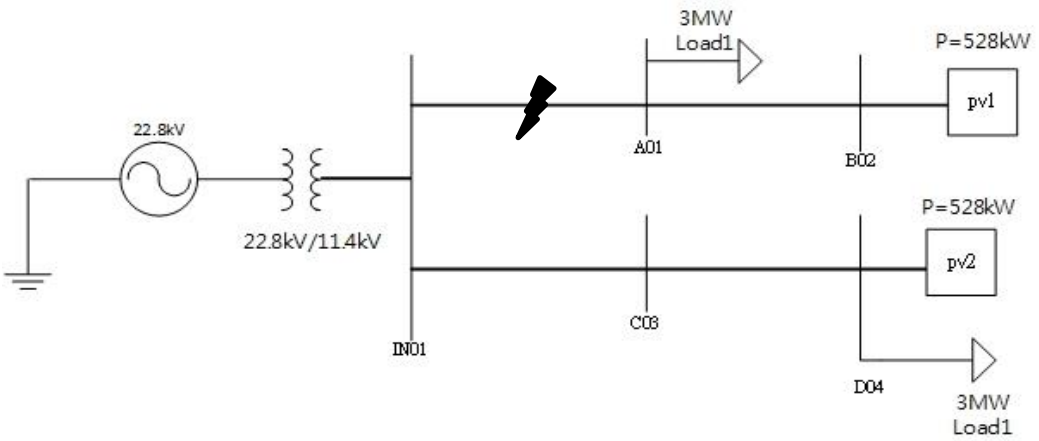
▲圖(四) 含分散式電源配電網在 Simulink 模擬



▲圖(五) 含分散式電源配電網在 EMPT 模擬

表 4 Simulink 與 EMTP 個母線電壓標么值及誤差

Bus	Simulink(pu)	EMTP(pu)	誤差%
IN01	1.00	1.00	0
A01	0.98	0.982	0.204
B02	0.983	0.988	0.506
C03	0.98	0.982	0.204
D04	0.96	0.986	2.637



▲圖(六) 含分散式電源配電網故障發生處

將故障點設置於 IN01-A01 之間(如圖六)，並將故障設置為 10 cycle，分別模擬 ABC 三相短路、AC 兩相短路及 A 單相短路，並測量流過 B02 的故障電流。可以由表 5 看出當故障為 ABC 三相短路故障時，在 Simulink 與 EMTP 流過母線 B02 時測量到的故障電流 RMS 值；表 6 則為 AC 兩相短路在 Simulink 與 EMTP 流過母線 B02 時測量到的故障電流 RMS 值；表 7 則為 A 單相短路在 Simulink 與 EMTP 流過母線 B02 時測量到的故障電流 RMS 值。

表 5 Simulink 與 EMTP 在 B02 測量到的故障電流 RMS 值(ABC 三相短路)

	Ia(A)	Ib(A)	Ic(A)
Simulink	28.9	28.9	28.9
EMTP	25.8	24.2	24.2
誤差	12.01%	12.01%	12.01%

表 6 Simulink 與 EMTP 在 B02 測量到的故障電流 RMS 值(AC 兩相短路)

	Ia(A)	Ib(A)	Ic(A)
Simulink	331.1	294.8	302.3
EMTP	320.2	291.7	323.6
誤差	3.40%	1.06%	6.58%

表 7 Simulink 與 EMTP 在 B02 測量到的故障電流 RMS 值(A 單相短路)

	Ia(A)	Ib(A)	Ic(A)
Simulink	257.2	203.6	215.2
EMTP	249.4	202.1	215.9
誤差	3.12%	0.54%	0.32%

造成 Simulink 與 EMTP 這兩套軟體的模擬結果差異，是因為 PV 模塊的模型。舉例來說，在 Simulink 內的 PV 要獲取 528kW 的發電量，只能取近示值，在這裡我們取 529.32kW 左右，而在 EMTP 則可以直接設定我們想要的 PV 發電量。另外變流器的控制方式也不盡相同，其他例如 EMTP 使用光伏場的等效模型都會造成兩者模擬結果的不同。

三、 探討含分散式電源之配電系統保護方式與解析

配電網保護系統的設計是當今面臨的主要技術挑戰之一，保護系統必須能夠響應公用電網的所有故障。如果故障發生在公用電網，保護系統應盡快地將配電網從公用電網斷開，以對配電網的產生保護作用。斷開的速度取決於配電網特定的用戶負載，但仍需要開發和安裝適當電力電子靜態開關，另外，帶方向過電流保護的電動斷路器也是一種選擇。如果故障發生在配電網內部，保護系統應隔離配電線路盡可能小的部分來清除故障[1]。

多數傳統的配電網保護基於故障電流檢測。分散式電源可能改變故障電流的幅值和方向，從而導致保護誤動作。直接耦合的基於旋轉電機的分散式電源將會增大故障電流大小，而電力電子接口的分散式電源不能正常地提供過電流保護動作所需的大小。一些傳統的過電流測量設備甚至不能響應小的故障電流，而即便能響應也需要數秒的時間，而不是保護要求的幾分之一秒。因此，在配電網的許多運轉場合，可能會出現與保護系統的選擇性(錯誤的、不必要的跳脫)、靈敏性(未檢測到的故障)和速動性(延遲跳脫)相關的問題。

與配電網保護相關的問題可以概括如下：

1) 故障電流大小和方向的變化，取決於是否有分散式電源接入。

2) 在分散式電源接入處，故障檢測靈敏度和快速性的降低。

3) 由於分散式電源對故障電流的影響，使得電網斷路器因鄰近線路故障而產生不必要跳脫。

4) 增加的故障電流大小會超過開關設備目前的設計容量。

5) 配電線路斷路器的自動重合閘和熔斷器動作策略可能失效。

6) 基於含逆變器的分散式電源對故障電流貢獻的減少導致保護系統性能降低，尤其當配電網從公用電網斷開的時候更為明顯。

7) 饋線保護和電力公司在故障穿越(Fault Ride Through、FRT)的要求上存在矛盾，而許多分散式電源滲透率高的國家的電網規程中對此有明確規定。

8) 含有分散式電源的環狀和網狀配電網拓樸的影響。

本章介紹了一種配電網保護解決方法，能夠克服上面提到的一些問題。該方法基於自我調整原理、根據提前計算或即時計算出整定值，按照配電網的配置來改變保護的整定，且分析了由於專用設備帶來的故障電流的增加。

(1)配電系統保護之設計準則

一般來說，將配電系統劃分為多個本地保護區域，每個區域都安裝了線路(架空線路和電纜)保護和裝置(母線、變壓器、發電機和負載等)保護。

配電保護系統的設計標準“3S”的要求，即

1) 靈敏性(Sensitivity)：保護系統應該能夠分辨出超過正常閥值的非正常狀態。

2) 選擇性(Selectivity) ：保護系統應該只斷開系統故障的部分(或者包含故障的最小的可能部分)以便將故障的影響降到最小。

3) 速動性(Speed) ：保護電驛應該用可能的最短時間來響應非正常狀態，以避免設備損壞並保持系統穩定。

而“3S”可以延伸為

1) 可靠性：當需要動作的時候，保護必須準確動作(檢測並斷開被保護區域內的一切故障)並且應該在其自身發生故障時依然發揮既定的功能。
2) 安全性：當不需要動作的時候，保護系統不動作(拒絕所有非故障的電力系統事件和瞬變現象)並且應該在其自身發生故障也避免誤動。
3) 冗餘性：保護系統應該考慮電驛的冗餘功能來提高可靠性。冗餘功能的設計被稱為後備保護。此外，冗餘性可以透過不同的保護原理的結合來實現，比如傳輸線路的距離和差動保護。
4) 費用：最低成本來實現最大程度的保護。

(2)配電系統保護方式

I. 過電流和方向過電流保護

配電網中的饋線一般是輻射狀的，負載沿著饋線分布，所以配電網的保護在設計時通常假定潮流是單向的。這種保護基於大故障電流的檢測，採用熔斷器、熱磁開關和箱式斷路器實現，其中箱式斷路器使用帶有時間—電流識別功能的標準過電流(OC)電驛(ANSI 51)。而環狀和網狀電網的保護中一般採用更為複雜的方向過電流電驛(ANSI 67)。

II. 距離保護

有些供電公司線上路保護中採用距離保護(ANSI 21)。距離保護計算保護安裝位置的電壓和故障電流的比值確定保護安裝位置到故障點的阻抗。一般來說，距離保護有 3 個保護區域，區域 1 覆蓋 80%～85%被保護線路的長度，區域 2 覆蓋 100%被護線路及 50%下一條線路的長度，區域 3 覆蓋 100%被保護線路和 100%第二條線路，以及 25%第三條線路的長度。如果故障發生在距離保護動作區域內，測量的阻抗值將會小於整定值，距離保護就會跳開斷路器。不過，由於距離保護的測量阻抗是線路電流的函數，分散式電源和負載會影響距離保護而導致其不正確動作。

III. 差動保護

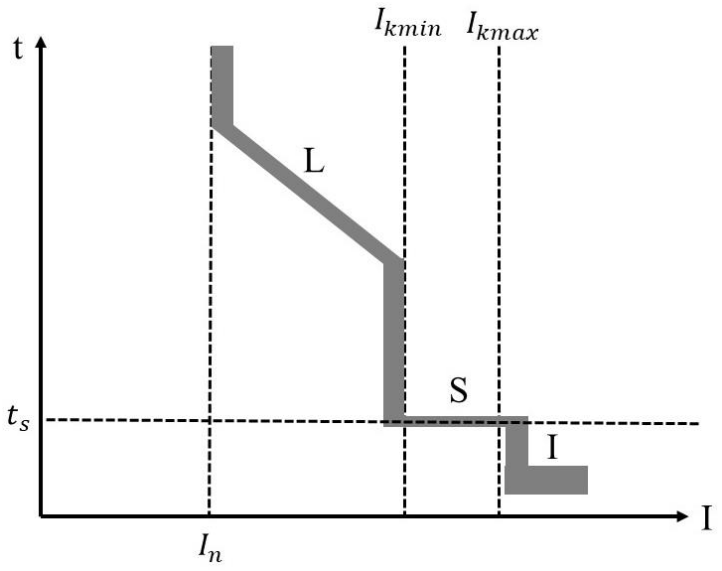
差動式過電流保護(ANSI 87)主要用於保護像分散式電源和變壓器這樣的重要設備。如今，利用線路端通訊(如電纜附線、光纖、無線電或者微波等)的差動保護也廣泛地用於地下配電線路的保護。該保護有很高的選擇性並且只在發生內部故障時才會動作，但是需要一個可靠的通訊設備(如電纜附線、光纖或微波通道等)，以便暫態數據可以在被保護元件兩端傳遞。由於差動保護易受通訊故障影響，具有一定的脆弱性，因此需要有獨立的後備保護，這樣就提高了保護系統的成本，並限制了其在配電網中的應用。

儘管有些保護原理也可以用在低電壓等級的配電網中，但過電流保護主要的保護。因此，下面的章節將重點討論配電網中的過電流保護。

(3)配電網饋線過流保護

過電流保護利用流入故障位置的大電流來檢測故障。在現代的數位式(基於微處理器的)電驛中，跳脫電流可以整定在一個較廣的範圍，例如斷路器額定電流的 0.6~15 倍。如果測量的線電流超過整定值，電驛經過一定的延時後動作，跳開線路斷路器。

一個典型的現代斷路器過電流跳脫曲線如圖(七)所示。該跳脫曲線包括一反時限部分 L(過負載保護)、一個定延時部分 S(帶短時間延時跳脫的短路電流保護)和一個瞬時部分 I(短路電流瞬時保護)。

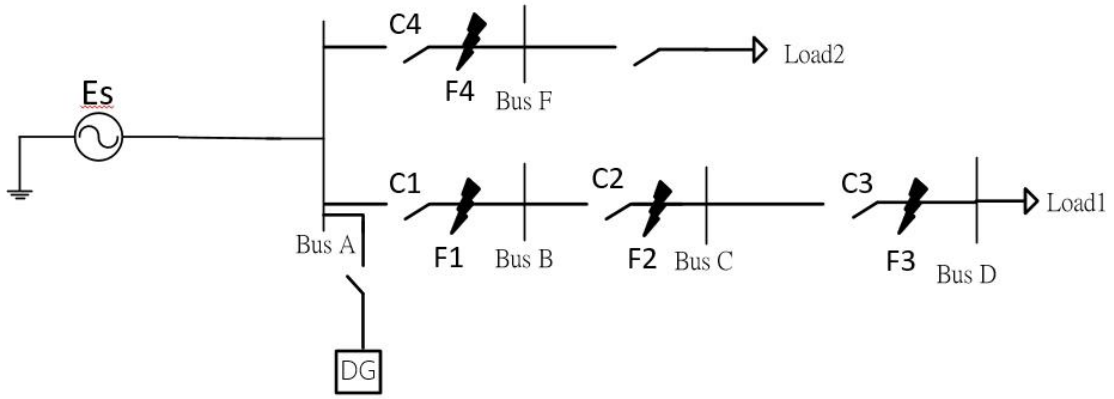


▲圖(七)帶電子跳脫器的低壓斷路器典型時間—電流跳脫曲線

四、 DG 接入配電網不同位置時對配電網過電流保護之解析

(1)DG 接入配電網饋線始端

如圖(八)為 DG 接入配電網饋線始端的單線圖，DG 接入配電網饋線的始端母線 A 處。其中，E_s表示配電網系統的電源電壓Z_i表示系統的等效阻抗；Z_{AB}、Z_{BC}、Z_{CD}、Z_{AF}分別表示線路 AB、BC、CD、AF 的等值阻抗；線路 AB 的F_1處、線路 BC 的F_2處、線路的F_3處、線路 AF 的F_4處分別為本計畫所假設的發生短路故障的位置。



圖(八)配電網始端母線上接入 DG 單線圖

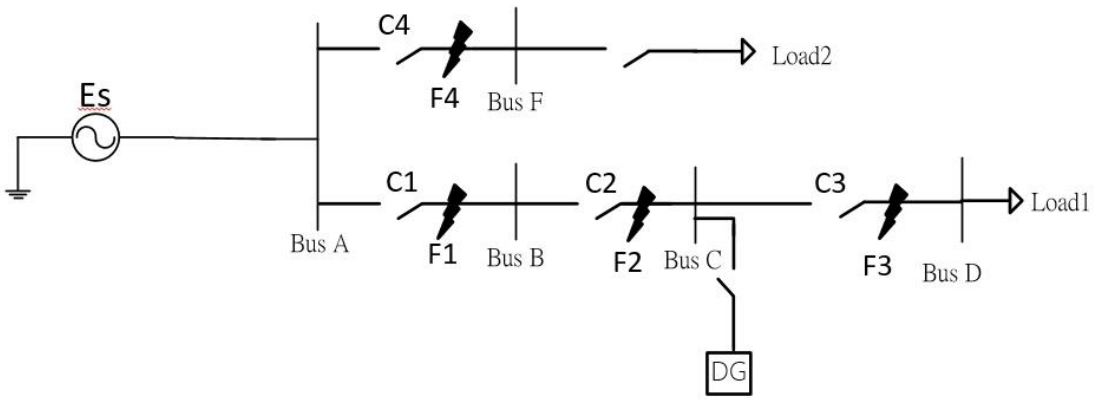
在 DG 接入配電網饋線始端母線的情況下，其相當於電源的容量的增加，對於配電網的影響也很有限，且相對於系統電源的容量來說，DG 的容量相對很小，所以當發生三相短路時，其對於線路電流保護的影響比較小。但當 DG 的接入容量較大時，則會明顯增加配電網的故障電流值，對原有電流保護產生較大影響。所以，對於 DG 接入配電網饋線始端母線的情況，需要根據分散式電源實際的容量進行考慮。

(2)DG 接入配電網饋線中端

如圖(八)的配電網，DG 接入配電網饋線中間母線 C 處。當線路 AB 的F_1處、線路 BC 的F_2處、線路 CD 的F_3處、線路 AF 的F_4處分別發生三相短路時，會對電流保護造成不同的影響，下面分別對各個故障點發生三相短路時經過各保護的短路電流變化規律進行分析。

1) 線路 AB 的F_1處發生三相短路

當F_1處發生三相短路時，由E_S產生的短路電流透過保護C_1流向故障點F_1，由 DG 產生的短路電流透過C_2流向故障點F_1。圖(九)為F_1處發生三相短路時配電網的等效電路圖。在圖(九)中 DG 的輸出功率表示為 P；系統側等效電源表示為E_S； Z_i表示系統等效阻抗；Z_{AF}以及Z_{ACF1}分別表示各線路所對應的阻抗值。

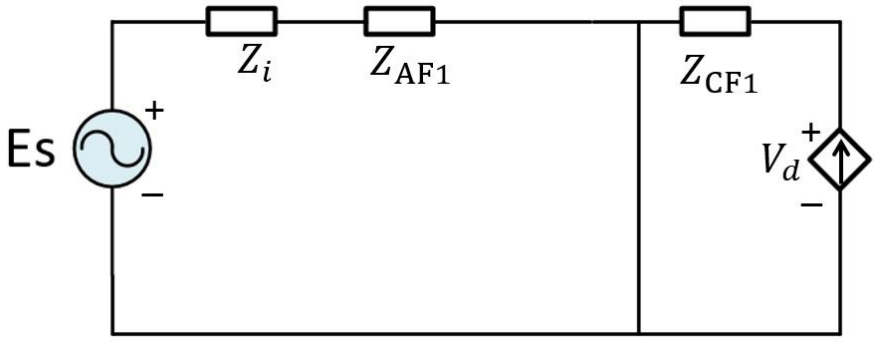


圖(九)配電網中端母線接入 DG 單線圖

由圖(十)可以得出流過保護C_1的故障電流為

$$I_{1F1} = \frac{E_s}{Z_i + Z_{AF1}} \tag{1}$$

式(1)中，I_{1F1}表示當F_1點發生三相短路時流過保護C_1的短路電流。



圖(十)DG 接入配電網中間母線時F_1點發生三相短路故障等效電路

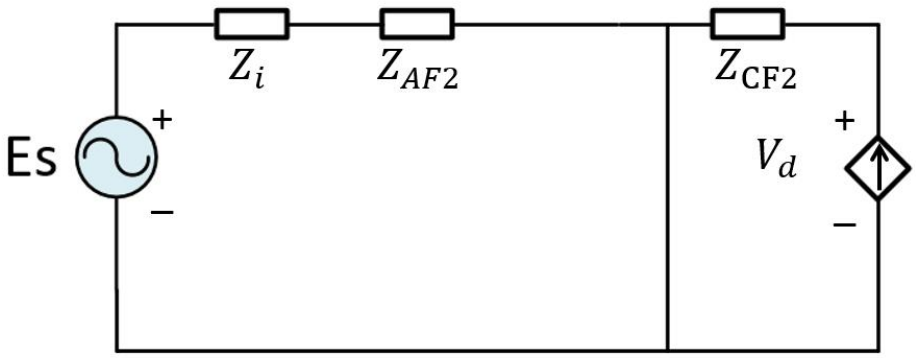
流過保護C_2的故障電流為

$$I_{2F1} = \frac{V_d}{Z_{BC} + Z_{BF1}} \tag{2}$$

式(2)中， I_{2F1}表示當F_1點發生三相短路時流過保護C_2的短路電流。

2) 線路 BC 的F_2處發生三相短路

當F_2處發生三相短路，由E_s產生的短路電流透過C_1和C_2流向F_2，由 DG 產生的故障電流流向F_2。圖(十一) F_2處發生三相短路時配電網的等效電路圖。在圖(十一)當中 DG 的輸出功率表示為 P；系統側等效電源表示為E_s；Z_i表示系統等效阻抗；Z_{AF2}以及Z_{CF2}分別表示各線路所對應的阻抗值。



圖(十一)DG 接入配電網中間母線時F_2點發生三相短路故障等效電路

由圖(十一)可以得出流過保護C_1以及保護C_2的故障電流為

$$I_{1F2} = I_{2F2} = \frac{E_s}{Z_i + Z_{AF2}} \tag{3}$$

式(3)中，I_{1F2}表示當F_2點發生三相短路時流過C_1的短路電流；I_{2F2}表示當F_2點發生三相短路時流過保護C_2的短路電流。

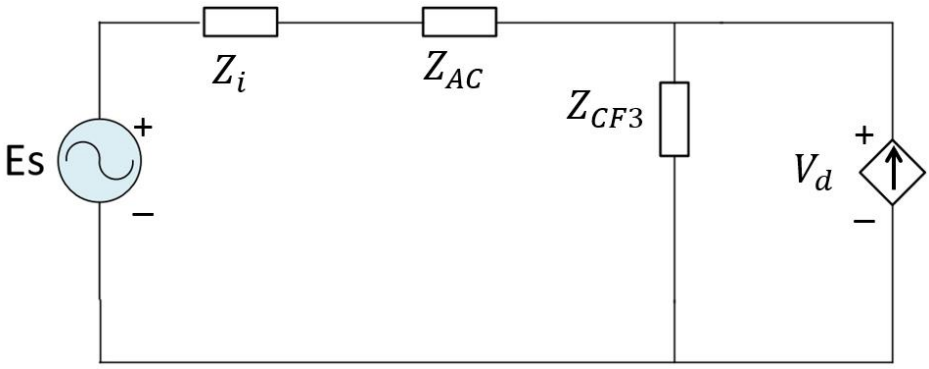
流過保護C_3的故障電流為

$$I_{3F2} = \frac{V_d}{Z_{CF2}} \tag{4}$$

式(4)中，I_{3F2}表示當F_2點發生三相短路時流過保護C_3的短路電流。

3) 線路 CD 的F_3處發生三相短路

當F_3處發生三相短路時，由 Es 產生的短路電流透過保護C_1、保護C_2以及保護C_3流向故障點F_3，由 DG 產生的短路電流透過C_3流向故障點F_3。圖(十二)為F_3處發生三相短路時配電網的等效電路圖，圖中 DG 的輸出功率為 P；系統側等效電源表示為E_s； Z_i表示系統等效阻抗；Z_{AC}以及Z_{CF3}分別表示各線路所對應的阻抗值。



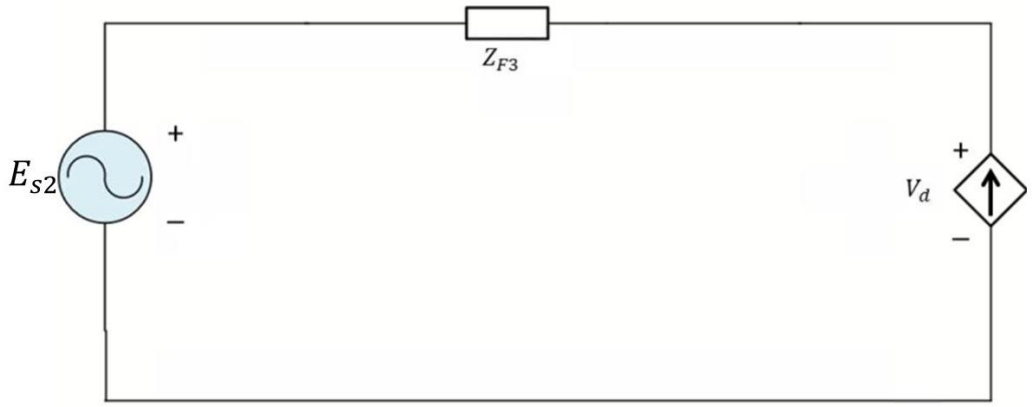
圖(十二)DG 接入配電網中間母線時F_3點發生三相短路故障等效電路

由圖(十二)我們可以得出流過保護C_1及C_2的短路電流為：

$$I_{1F3} = I_{2F3} = \frac{E_s - V_d}{Z_i + Z_{AC}} \qquad (5)$$

式(5)中，I_{1F3}、I_{2F3}分別表示當F_3點發生三相短路時流過保護C_1、C_2的短路電流。

利用戴維寧定理，得到圖(十二)的等效電路圖(十三)。



圖(十三)DG 接入配電網中間母線F_3點發生三相短路故障簡化等效電路

流過F_3的短路電流為：

$$I_{3F3} = \frac{V_d}{Z_{CF3}} \tag{6}$$

式(6)中， I_{3F3}表示當F_3點發生三相短路時流過保護C_3的短路電流。

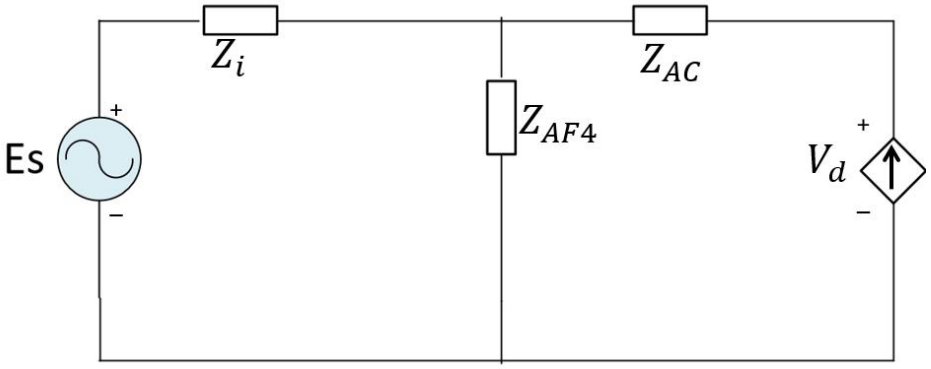
圖(十三)中的等效參數如式(6)、(7)：

$$Z_{F2} = \frac{(Z_i + Z_{AC}) \times Z_{CF3}}{Z_s + Z_{AC} + Z_{CF3}} \tag{6}$$

$$E_{s2} = E_s \frac{Z_{CF3}}{Z_i + Z_{AC} + Z_{CP3}} \tag{7}$$

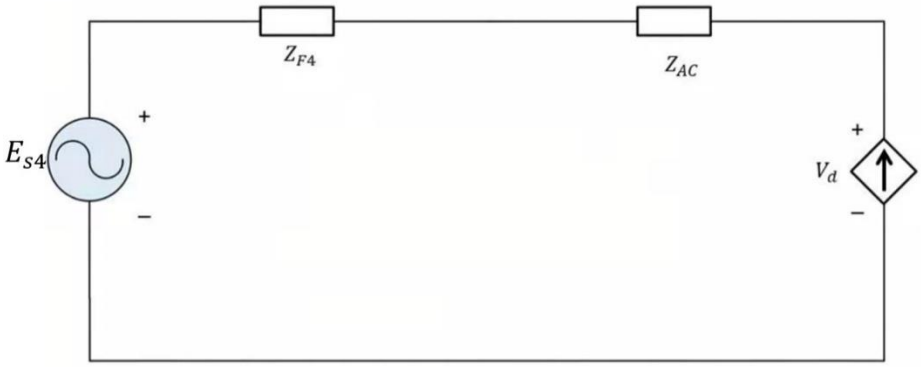
4) 線路 AF 的F_4處發生三相短路

當F_4處發生三相短路時，由系統電路E_s產生的短路電流透過保護C_4流向故障點F_4；同時，由 DG 同樣會貢獻短路電流值，其產生的短路電流透過C_1和C_2流向故障點F_4。圖(十四)F_4處發生三相短路時配電網的等效電路圖。圖中 DG 的輸出率為 P；系統側等效電源表示為E_s； Z_i表示系統等效阻抗；Z_{AC}以及Z_{AF3}分別表示各線路所對應的阻抗值。



圖(十四) DG 接入配電網中間母線F_4點發生三相短路故障等效電路

利用戴維寧定理，我們得到圖(十四)的等效電路圖(十五)



圖(十五)DG 接入配電網中間母線F_4點發生三相短路故障簡化等效電路

由圖(十四)可以得出流過保護C_1、C_2以及C_4的故障電流為

$$I_{1F4} = I_{2F4} = \frac{P}{V_d} \tag{8}$$

$$I_{4F4} = \frac{V_d - Z_{CA}P}{V_d} \cdot \frac{1}{Z_{AF4}} = \left(1 - \frac{Z_{CA}P}{V_d} \cdot \frac{1}{Z_{AF4}}\right) \tag{9}$$

式(8)、(9)中，I_{1F4}、I_{2F4}以及I_{4F4}表示當F_4點發生三相短路時流過保護C_1、C_2以及C_3的短路電流。

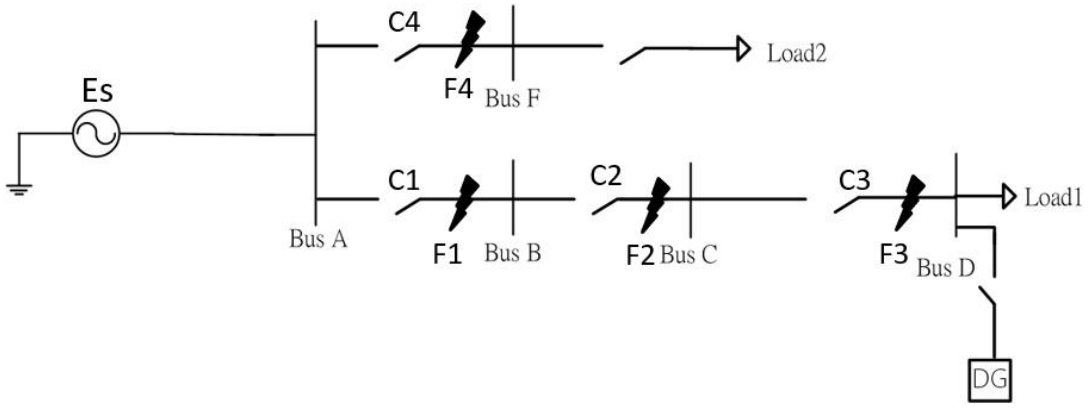
在圖(十五)中的等效參數如式(10)、(11)：

$$Z_{F4} = \frac{(Z_S)(Z_{AF4})}{Z_S + Z_{AF4}} \tag{10}$$

$$E_{S4} = E_S \frac{Z_{AF4}}{Z_S + Z_{AF4}} \tag{11}$$

(3)DG 接入配電網饋線末端

如圖(十六)的配電網單線圖，DG 接入配電網饋線的末端母線 D 處。當線路 AB 的F_1處、線路 BC 得F_2處、線路 CD 的F_3處、線路 AF 的F_4處分別發生三相短路時，會對電流保護造成不同的影響，下面分別對各個發生短路的點進行分析。



圖(十六)配電網末端母線接入 DG 單線圖

1) 線路 AB 的F_1處發生三相短路

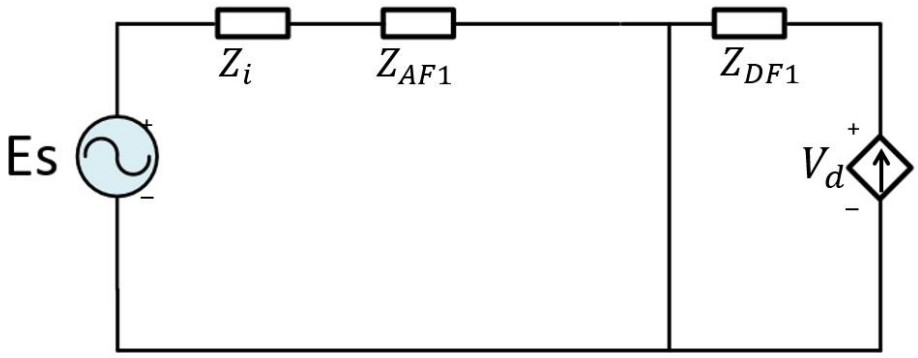
當F_1處發生三相短路時，由E_S產生的短路電流透過保護C_4流向故障點F_4，由 DG 產生的短路電流透過C_3和C_2流向故障點F_1。圖(十七)為F_1處發生三相短路時配電網的等效電路圖。圖中 DG 的輸出功率為 P；系統側等效電源表示為E_S；Z_i表示系統等效阻抗；Z_{AF1}以及Z_{DF1}分別表示各線路所對應的阻抗值。

由圖(十七)我們可以得出流過保護的短路電流為：

$$I_{1F1} = \frac{E_s}{Z_s + Z_{AF1}} \tag{12}$$

流過保護C_2以及C_3的短路電流為

$$I_{2F1} = I_{3F1} = \frac{V_d}{Z_{DF1}} \tag{13}$$

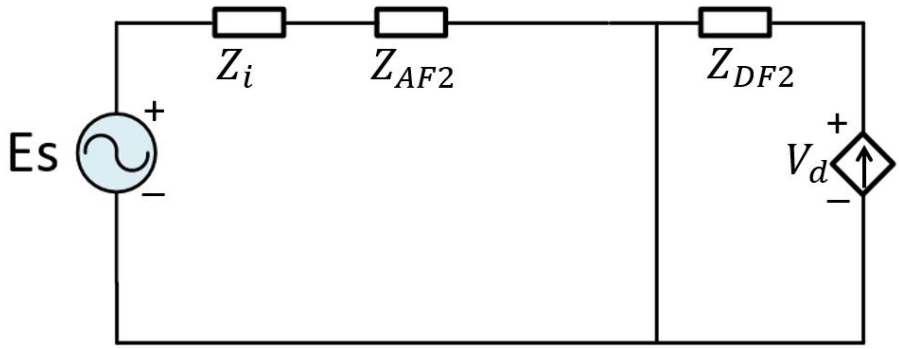


圖(十七)DG 接入配電網末端母線時F_1點發生三相短路故障等效電路

式(12)中，I_{1F1}表示當F_1點發生三相短路時流過保護C_1的短路電流；式(13)中，I_{2F1}表示當F_1點發生三相短路時流過保護C_2的短路電流；I_{3F1}表示當F_1點發生三相短路時流過保護C_3的短路電流。

2) 線路 BC 的F_2處發生三相短路

當F_2處發生三相短路時，由E_s產生的短路電流透過保護C_1和保護C_2流向故障點F_2，由 DG 產生的短路電流透過C_3流向故障點F_2。圖(十八)為F_2處發生三相短路時配電網的等效電路圖。圖中 DG 的輸出功率為 P；系統側等效電源表示為E_s； Z_i表示系統等效阻抗；Z_{AF2}以及Z_{DF2}分別表示各線路所對應的阻抗值。



圖(十八)DG 接入配電網末端母線時F_2點發生三相短路故障等效電路

由圖(十八)可以得出流過保護C_1以及C_2的短路電流為

$$I_{1F2} = I_{2F2} = \frac{E_s}{Z_s + Z_{AF2} + Z_t} \tag{14}$$

式(14)中，I_{1F2}表示在F_2位置有三相短路故障時流過保護C_1的故障電流；I_{2F2}表示在F_2位置有三相短路故障時流過保護C_2的故障電流；流過C_3的短路電流為

$$I_{3F2} = \frac{V_d}{Z_{DF2}} \tag{15}$$

式(15)中，I_{3F2}表示在F_2位置有三相短路故障時流過保護C_3的故障電流。

3) 線路 CD 的F_3處發生三相短路

當F_3處發生三相短路時，由E_s產生的短路電流透過保護C_1、保護C_2和保護C_3流向故障點F_3，由 DG 產生的短路電流流向故障點F_3。圖(二十八)為F_3處發生三相短路時配電網的等效電路圖，圖中 DG 的輸出功率為 P；

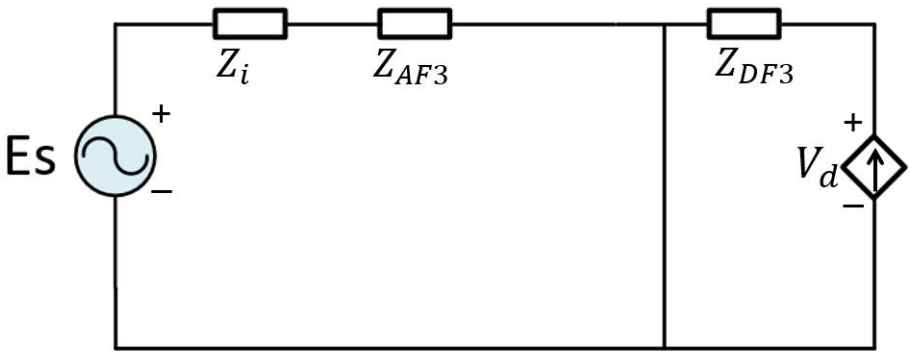
系統側等效電源表示為E_s；Z_i表示系統等效阻抗；Z_{AF3}以及Z_{DF3}分別表示各線路所對應的阻抗值。

由圖(十九)我們可以得流過保護C_1的短路電流為：

$$I_{1F3} = \frac{E_s}{Z_s + Z_{AF3}} \tag{16}$$

流過保護C_2短路電流為

$$I_{2F3} = \frac{E_s}{Z_s + Z_{AF3}} \tag{17}$$



圖(十九)DG 接入配電網末端母線時K_3點發生三相短路故障等效電路

流過保護C_3的短路電流為

$$I_{3F3} = \frac{V_d}{Z_{DF3}} \tag{18}$$

式(16)中，I_{3F3}表示在F_3位置有三相短路故障時流過保護C_1的故障電流；式(17)中，I_{2F3}表示在F_3位置有三相短路故障時流過保護C_2的故障電流；式(18)中，I_{3F3}表示在F_3位置有三相短路故障時流過保護C_3的故障電流。

4) 線路 AF 的F_4處發生三相短路

當F_4處發生三相短路時，由E_s產生的短路電流透過保護C_4流向故障點F_4，由 DG 產生的短路電流透過保護C_3、保護C_2和保護C_1流向故障點F_4。圖(二十)為F_4處發生三相短路時配電網的等效電路圖，透過等效電路圖，研究短路電流的變化規律。圖中 DG 的輸出率為 P；系統側等效電源表示為E_s；Z_i表示系統等效阻抗；Z_{AD}以及Z_{AF3}分別表示各線路所對應的阻抗值。

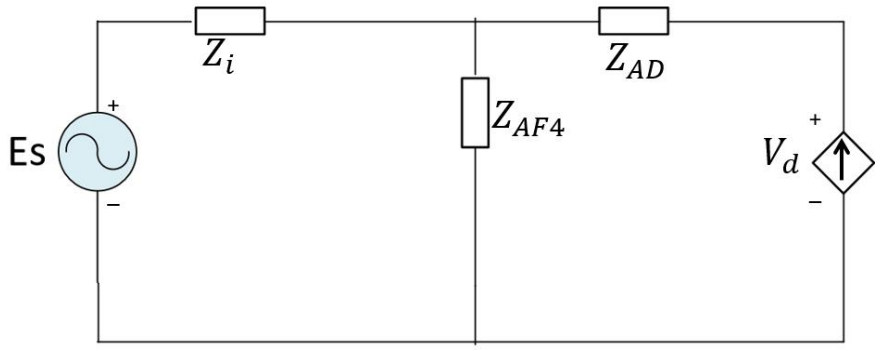
圖(二十一)中等效參數如式(19)、(20)：

$$Z_{F4} = \frac{Z_s \times Z_{AF4}}{Z_s + Z_{AF4}} \tag{19}$$

$$E_{s4} = E_s \frac{Z_{AF4}}{Z_s + Z_{AF4}} \tag{20}$$

由圖(二十一)可得出過保護C_1以及保護C_2的短路電流為式(21)

$$I_{1F4} = I_{2F4} = \frac{P}{V_d} \tag{21}$$



圖(二十)DG 接入配電網末端母線時F_4點發生三相短路故障等效電路

利用戴維寧定理，得到圖(二十)的等效電路圖(二十一)。

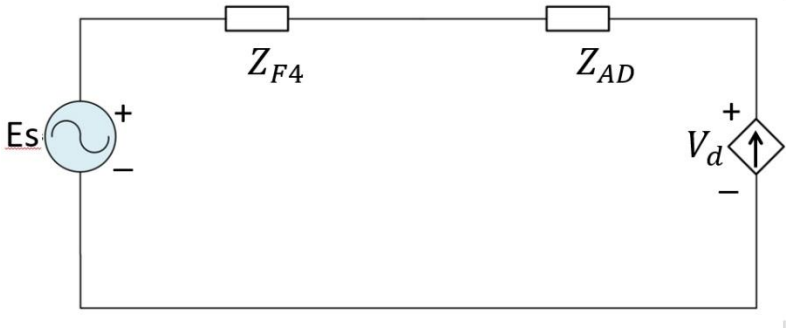
流過保護C_3的短路電流為

$$I_{3F4} = \frac{P}{V_d} \tag{22}$$

流過保護C_4的短路電流為

$$I_{4F4} = \frac{V_d - Z_{DA}P}{V_d} \cdot \frac{1}{Z_{AF4}} \tag{23}$$

式(21)中，I_{1F4}表示當F_4點發生三相短路時流過保護的短路電流，I_{2F4}表示當F_4點發生三相短路時流過保護C_2的短路電流；式(22)中，I_{3F4}表示當F_4點發生三相短路時流過保護C_3的短路電流；式(23)中，I_{4F4}表示當F_4點發生三相短路時流過保護C_4的短路電流。



圖(二十一)DG 接入配電網末端母線時F_4點發生三相短路故障簡化等效電路

綜上所述，分析 DG 併入配電網上中下游及四個不同故障點的位置，透過等效電路與計算故障電流公式，觀察出流過各保護的短路電流大小的變化並不相同，代表當 DG 在配電網不同位置時，對不同的保護的影響是不同的。

五、 基於提前計算整定值的自我調整電流速斷保護

自我調整電流保護的目的是為了實現任何狀態下電驛保護都可以正確動作，保護整定值不是一成不變的，會隨著電網運轉狀態或者故障狀態而即時調整。保護定值依靠通訊設備進行線上計算。具體步驟為：先透過程序判別故障類型及線路運轉狀態，再採樣各保護的電壓和電流值，然後計算故障線路的故障電流值，最後得出自我調整電流速斷保護的整定值[2-

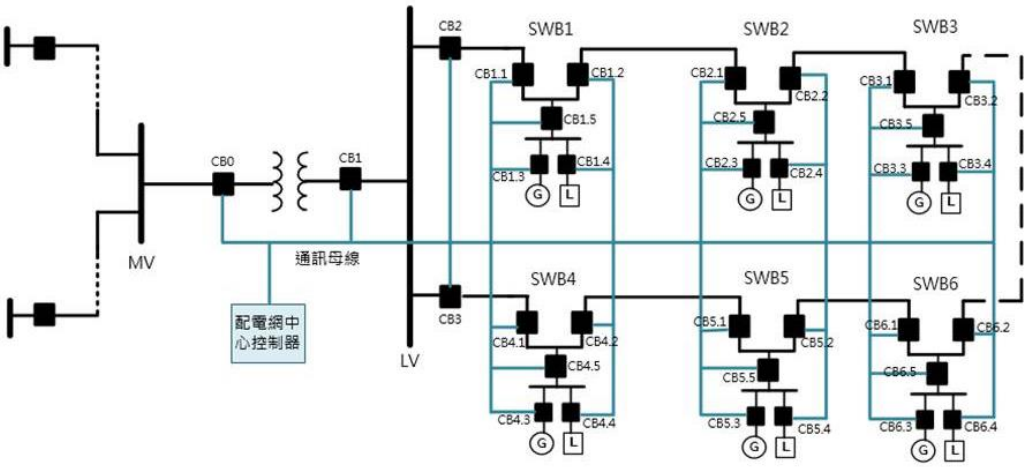
5]。

自我調整電流速斷保護定義為“透過外部產生的信號或控制行為線上即時地修改保護策略，以響應系統狀態或要求的變化”[6]，而實現配電網自我調整電流速斷保護的技術需求和建議有：

1) 使用數位或方向過電流電驛。這是由於熔斷器或機械式和固態電驛(尤其為了保持選擇性)不具備改變整定值或跳脫特性的靈活性，並且它們沒有對電流方向的靈敏性。
2) 所採用的數位式方向過電流電驛必須能夠提供不同的跳脫特性(多組整定值，比如用於低壓的現代數位過電流保護有 2~3 組整定值)，可以本地、遠程、自動或者手動進行參數調整。
3) 使用新的/現有的通訊設施(例如電力線載波或無線電)和標準的通訊協議(Modbus，IEC 61850 等)。電驛可以和中央計算機或不同電驛之間進行快速、可靠的通訊和訊息交換來保證所需性能。

下面提出了基於提前計算和“可信的”整定值組來進行配電網動態自我調整電流速斷保護設計的步驟，還討論了另一種基於即時計算整定值的自我調整電流速斷保護的設計方案。

集中自我調整電流速斷保護系統的原理可以用下面的例子說明。首先考慮圖(二十二)中的配電網，除了主要的開關設備，該電網還包括一個配電網中央控制器(DGCC)和一套通訊系統。DGCC 的功能可以透過位於二級配電變電所(MV/LV)的可編程序邏輯控制器(PLC)、工作站或一般的電腦實現。DGCC 與每個集成方向過電流保護的斷路器採取主—從結構。通訊系統使用標準的工業通訊協議 Modbus[7]和串行通訊總線 RS-485，使這些斷路器具備與 DGCC 交互訊息的能力。而 DGCC 可以從各個斷路器讀入數據(狀態)，並在必要時修改電驛的整定值(跳脫特性)。



▲圖(二十二)集中式自我調整電流速斷保護系統

當故障發生時，每個電驛由本地決定是否跳脫(獨立於 DGCC)。自我調整模塊的主要目的為每個過電流電驛的整定值與配電網當前的狀態相符(同時考慮了電網配置和分散式電源的狀態)。

DGCC 自我調整模塊的任務是週期性檢查並更新整定值，它主要包括兩個主要部分：

1) 離線故障分析模塊：提前對給定的配電網進行離線故障分析，得到事件表和動作表。
2) 線上運轉模塊。

為了進行離線故障分析，會建立一套事件表，用於記錄配電網配置和在分散式電源的狀態(運轉/停運)。事件表中的每個記錄均包含一系列的元素，元素的數目與配電網監測的斷路器數目相等(有些元素可能比其他元素的優先，比如連接低壓和中壓電網的中心斷路器)，元索為二進制編碼，即元素為 1 時表示斷路器閉合，元素為 0 時表示斷路器斷開(圖二十三)。

另外，流經所有被監測斷路器的故障電流是透過對配電網的不同位置發生不同類型的短路故障(相故障、相對地故障等)進行模擬獲得的。透過更改配電網的拓撲、分散式電源或負載的狀態，重複計算短路故障電流。對配電網不同狀態下、不同故障位置進行處理，將計算的結果(流過每個電驛故障

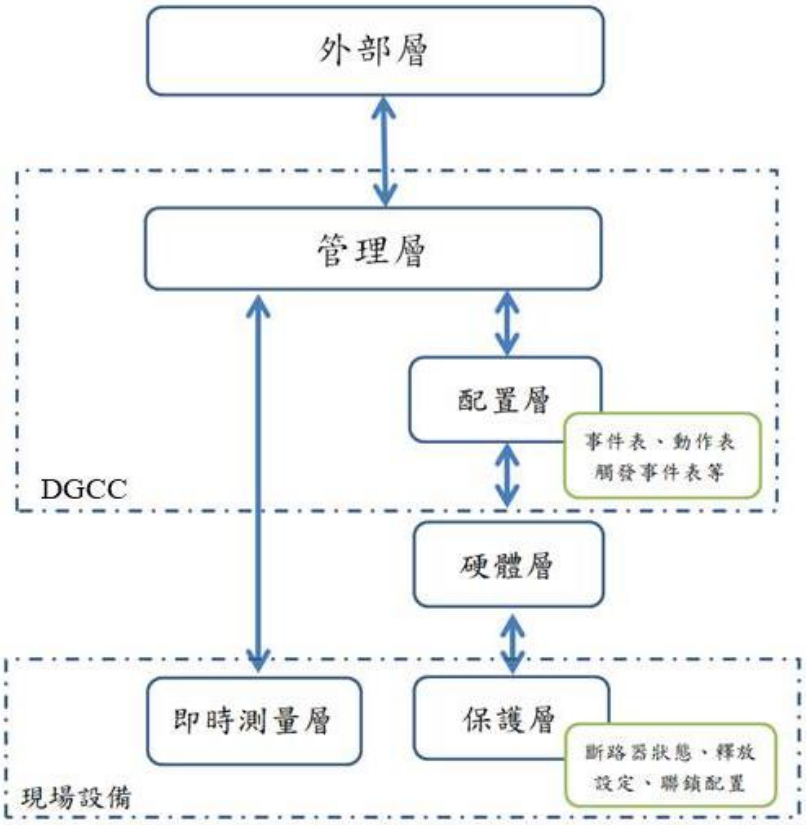
電流的幅值和方向)以特定的數據格式記錄下來。

	CB0	CB1	CB2	CB1.1	CB1.2	CB1.3	CB1.4	CB1.5	CB2.1	CB2.2	CB2.3	CB2.4	CB2.5	CB3.1	CB3.2	CB3.3	CB3.4	CB3.5		CB6.4	CB6.5
一般情況	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	…	1	1
情況 1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	…	0	1
⋮																					
情況 n	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	…	1	1

▲圖(二十三)事件表架構

基於這些結果計算出每個方向過電流保護電驛的整定值，適用於各種特定系統狀態，達到配電網保護的選擇性。

事件表和動作表屬於配電網保護與控制系統的配置層，如圖(二十四)所示。



▲圖(二十四)配電網保護和控制系統

1) 外部層代表電力市場價格、天氣預報和其他電網訊息。

2) 管理層包含歷史測量值和配電管理系統 DMS。

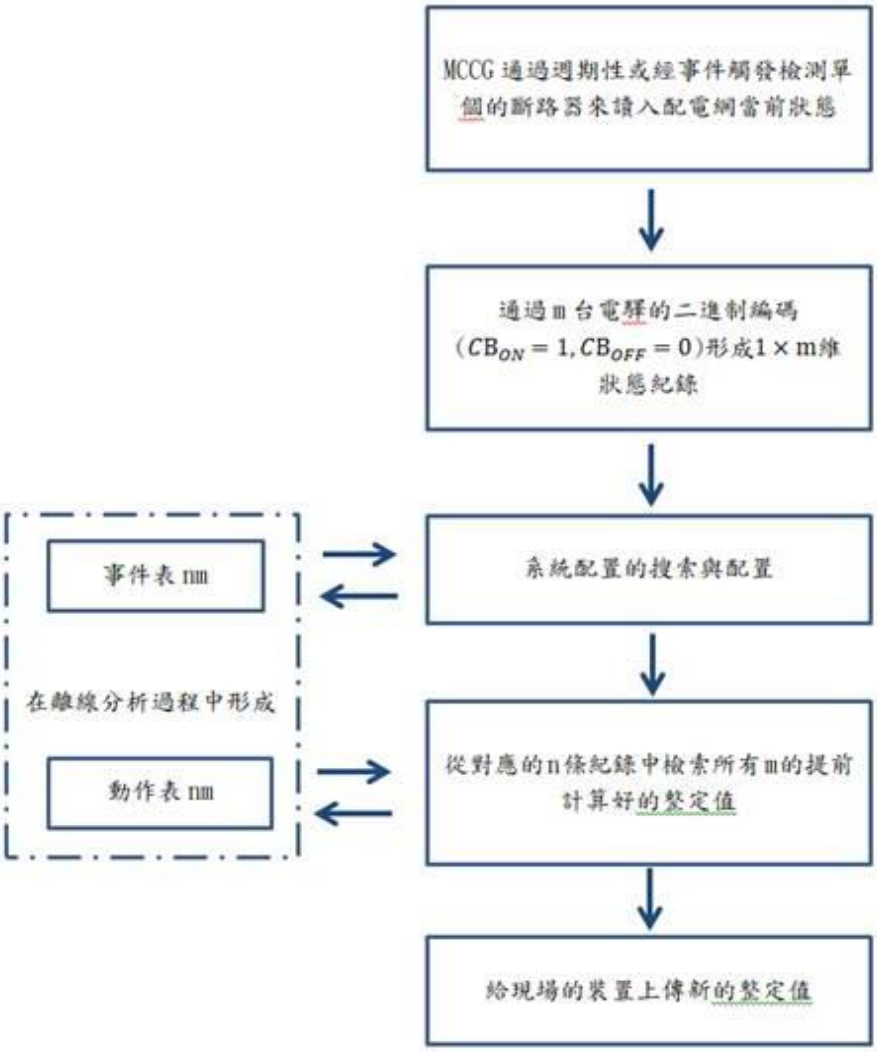
3) 配置層包括處於中心位置(變電站)或本地(配電盤)的工作站或 PLC，能夠檢測系統狀態的變化並發送需要的動作指令給硬體層。

4) 硬體層透過通訊網絡從配置層傳遞需要的動作訊息給現場設備。如果配電網的規模較大，這一功能可以分配給數個本地控制器，這些控制器只傳遞選定的訊息給中心單元。

5) 保護可能包括斷路器的狀態、整定值和聯鎖功能配置等訊息。

保護層與即時測量層一起內置於現場設備。

線上運轉時，DGCC 透過監測方向過電流電驛來監測配電網的運轉狀態。這過程週期性進行或透過事件觸發(斷路器跳脫、保護報警等)，如圖(二十四)所示。DGCC 根據接收到的配電網狀態訊息構建狀態記錄(該狀態記錄與事件表中單個紀錄的維度相同)，匹配事件表中的對應記錄。最後，算法從動作表對應的記錄中獲取提前計算好的電驛保護整定值組，並透過通訊系統上傳給現場設備。DGCC 也可以傳遞指令給現場的保護裝置，來切換系統配置過程中預先存儲在保護設備中的整定值組。



▲圖(二十五)配電網保護和控制系統

六、 不同節點狀態下，動態保護協調案例分析

以圖(二十六)所示的配電網拓樸作為案例，下表總結了配電網整體參數之數值[8]。

電網參數	數值
額定電壓/V	6000
短路容量/MVA	500

配電網變壓器參數	數值
額定電壓(一次/二次)/V	6000/400

額定功率/kVA	630
短路電壓百分比 Vcc(%)	4

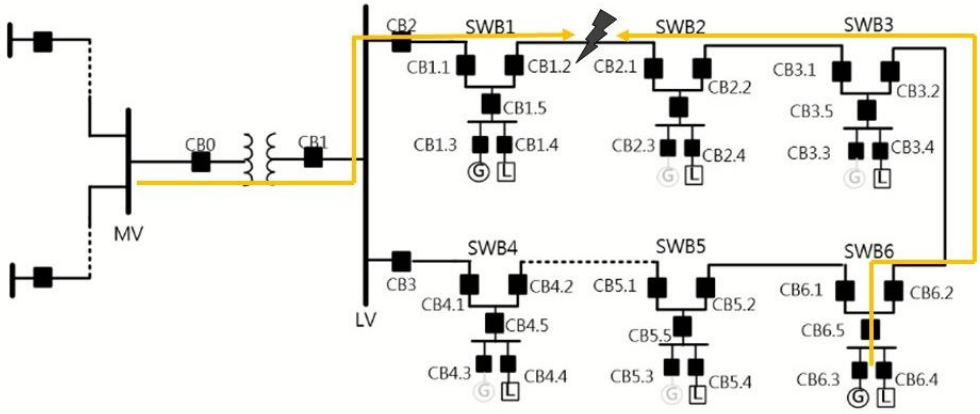
饋線斷路器參數	**數值**
額定電壓/V	400
額定電流/A	800

負載參數	**數值**
額定電壓/V	400
額定電流/A	100
額定功率因數 cos	0.9

分散式電源參數	**數值**
額定電壓/V	400
額定視在功率/kVA	160
額定功率因數 cos	0.8
直軸次暫態電抗X_d''	9.6
交軸次暫態電抗X_q''	10.2
直軸暫態電抗X_d'	21
交軸同步電抗X_q'	0.9260
負序電抗X_2	9.8
零序電抗X_0	2.1
直軸次暫態短路電流時間常T_d''/ms數	11
直軸暫態短路電流時間常數T_d'/ms	85

為了給不同的斷路器提供選擇性保護，在固定時間延遲部分 S 的I_{kmin}(預期的最小短路電流)和I_{kmax}(預期最大的短路電流)之間採用不同的時間延遲t_s。CB1 是最接近電源的斷路器，因而採用最長的時間延遲t_s。斷路器 CB3.2 和 CB6.2 離電源最遠，延時最短。為了簡化，圖中跳脫曲線省略了瞬時跳脫部分 I。

假設配電網 SWB4 和 SWB5 之間的電纜由於維護工作而斷開，SWB5 和 SWB6 透過 SWB3(CB3.2 和 CB6.2 閉合)進行供電，如圖(二十六)所示，兩台分散式電源連接在 SWB1 和 SWB6 上。其中，在此配電網中所有的過電流護電驛採用的過電流保護整定值t_s如表 8。



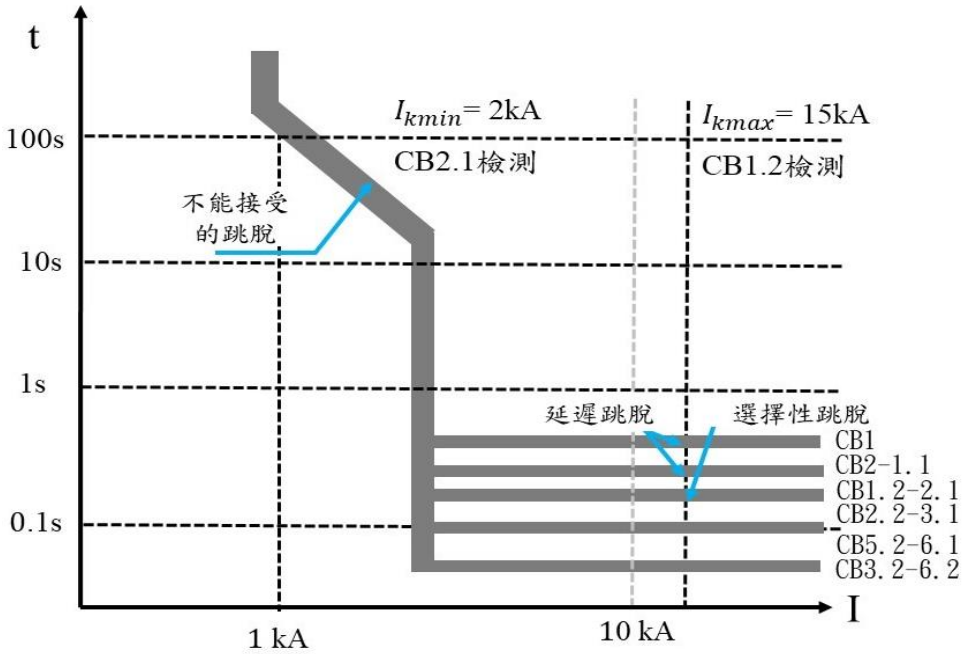
▲圖(二十六)含分散式電源的配電網

表 8 斷路器過流保護整定值

上層饋線		CB1	CB2	CB1.1	CB1.2	CB2.1	CB2.2	CB3.1	CB3.2
	t_s	0.3	0.2	0.2	0.15	0.15	0.05	0.05	0.1
下層饋線			CB3	CB4.1	CB4.2	CB5.1	CB5.2	CB6.1	CB6.2
	t_s		0.2	0.2	0.15	0.15	0.05	0.05	0.1

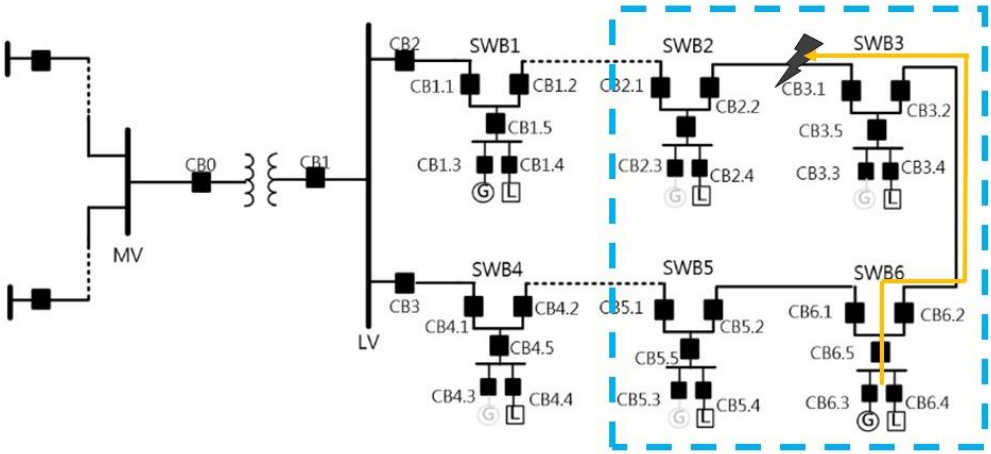
如果 SWB1 和 SWB2 之間發生故障(圖二十六)，CB1.2 將能夠發現並有選擇地將故障從主網斷開，這是因為由於接在 SWB1 的同步分散式電源的貢獻，CB1.2 檢測到的故障電流I_{kmin}=15kA(圖二十七)

由 SWB6 的第二個分散式電源提供的由 CB2.1 所檢測到的故障電流是 2kA(圖二十七)。該電流只能啟動電驛跳脫曲線的 L 部分，預期跳脫延時是 40s。因此，CB2.1 透過 CB1.2 的連跳功能斷開，並且在t_s=150ms 內將故障從低壓饋線斷開。考慮 CB1.2 中過電流電驛整定的t_s ≥150ms，這將影響到連接在 SWB1 上的慣性時間常數較小的分散式電源的穩定性。可行的解決方案是基於自我調整的方向性聯鎖。配電網中有過電流電驛的時間t_s延時整定為 50ms，且閉鎖訊號按照正確的方向傳遞，這將能夠避免配電網中分散式電源或者正常部分不必要的斷開。



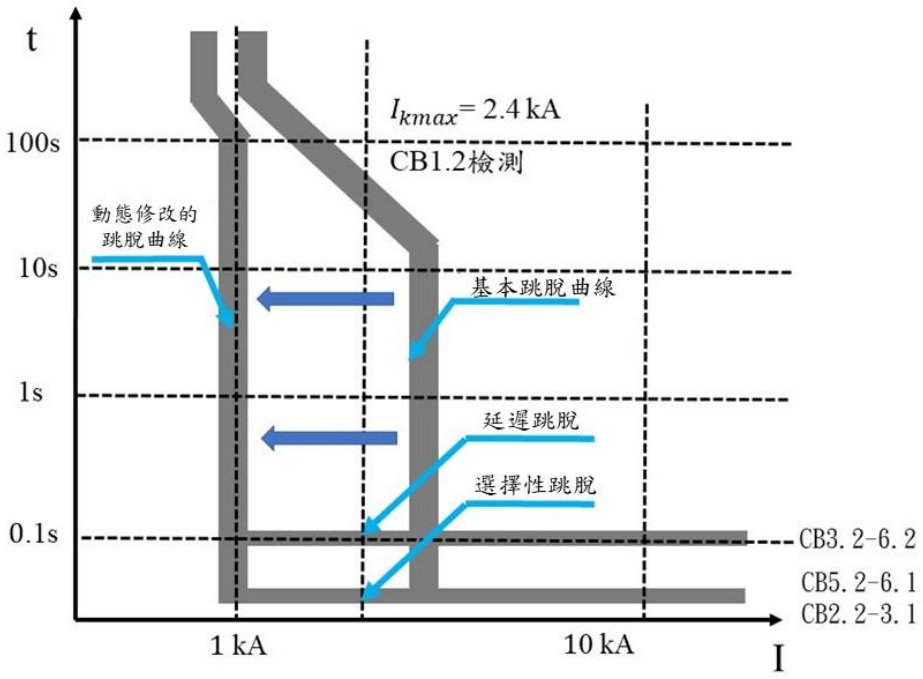
▲圖(二十七)採用過電流保護的跳脫曲線與跳脫順序[9]

接下來假設第一個故障隔離後，形成了如圖(二十八)所示的包括 SWB2、SWB3、SWB5 和 SB6 的孤島。連接在 SWB6 的分散式電源切換為頻率和電壓控制模式，並且孤島中的每個負載都從 100A 減小到 50A。



▲圖(二十八)成為孤島後的電網，SWB6 連接分散式電源

假設孤島後微電網的 SWB2 和 SWB3 之間發生了第二個故障，並且所有的非方向性過電流保護使用如表 8 所示的整定值t_s，在理想情況該透過 CB2.2 和 CB3.1 清除。CB2.2 不會跳脫，因為在 SWB2 不存在故障電流源，但是可以透過 CB3.1 的連跳功能斷開。 CB3.1 的t_s整定為 100ms，對應的最小故障電流大小為$4I_{nCB}$=3.2kA(I_{nCB}斷路器的額定電流，而在數位式電驛中，跳脫故障電流I_k可以整定在斷路器額定電流I_{nCB}的 0.6~15 倍，這裡我們取 4 倍)。而 CB3.1 檢測到的由 SWB6 分散式電源提供的最大故障電流I_{kmax}=2.4 kA(圖二十九)，因此啟動曲線 L 部分，跳脫時間延時為 25s。在這段時間內，SWB6 處的分布式電源將會在失步保護作用下斷開。



▲圖(二十九)改良後的跳脫曲線與跳脫順序

孤島時主電網對故障電流沒有貢獻，在這種情況下為了實現快速隔離故障，跳脫曲線必須能根據配電網的拓撲和連接的分散式電源的數量動態地向左移動。改善後的跳脫曲線如圖(二十九)所示。

如事件表和動作表所記錄的，在離線故障分析計算得到的孤島模式下所有斷路器的故障整定值如表 9 所示。

表 9 斷路器狀態以及改進後的過電流保護整定值I_{kmin}和t_s

上層饋線		CB1	CB2	CB1.1	CB1.2	CB2.1	CB2.2	CB3.1	CB3.2
		1	1	1	0	0	1	1	1
	I_{kmin}	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	1.2	1.2	1.2
	t_s	0.3	0.2	0.2	0.15	0.15	0.05	0.05	0.1
下層饋線			CB3	CB4.1	CB4.2	CB5.1	CB5.2	CB6.1	CB6.2
			1	1	0	0	1	1	0
	I_{kmin}		3.2	3.2	3.2	3.2	1.2	1.2	1.2
	t_s		0.2	0.2	0.15	0.15	0.05	0.05	0.1
分散式電源+負載	CB1.3	CB1.4	CB1.5	CB2.3	CB2.4	C2.5	CB3.3	CB3.4	CB3.5
	1	1	1	0	1	1	0	1	1
分散式電源+負載	CB4.3	CB4.4	CB4.5	CB5.3	CB5.4	CB5.5	CB6.3	CB6.4	CB6.5
	0	1	1	0	1	1	1	1	1

七、 探討自我調整電流速斷保護模擬

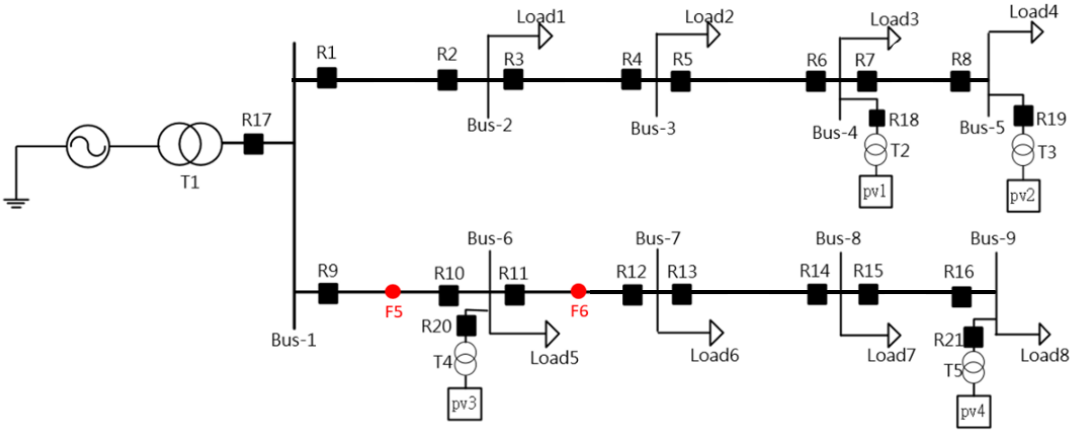
自我調整電流速斷保護在一定程度上彌補傳統電流保護的缺點，能隨著運轉狀態、故障類型等變化進而在線自動調整保護定值。但 DG 接入後會對傳統自我調整電流保護產生影響，因此在考慮 DG 的影響下，新的自我調整電流保護方案能達到更優保護性能，有重要的現實意義。

1. 分散式電源接入對傳統電流保護的影響

含分散式電源的配電網與傳統配電網相比，主要是短路時的電流的大小與方向可能有所變化。所以，本小節主要通過理論推導來分析分散式電源接入後，在不同位置短路對故障電流的影響。

系統沿用上一章的含分散式電源配電系統，如圖(三十)。接下來將針對故障點發生在 DG 上游及下游進行短路故障分析，我們將故障點分別設

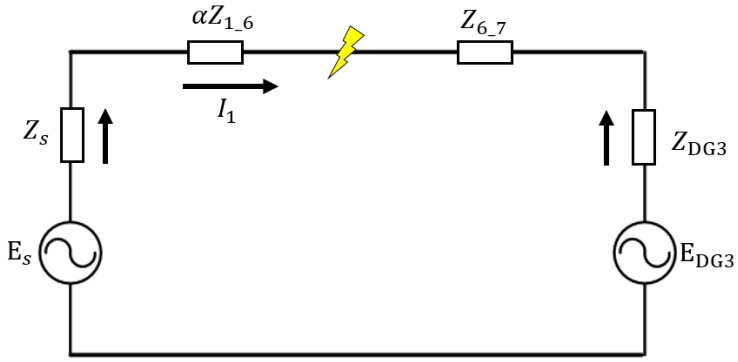
置在 F5 與 F6。



▲圖(三十) 含分散式電源配電系統

(1)DG 上游發生短路故障分析

當短路故障發生在 DG 上游的線路 1－6 上時(F5)，短路故障分析等效電路圖如圖(三十一)。其中E_S表示配電系統電源、Z_S表示其等效阻抗值；E_{DG}表示分散式電源、Z_{DG}表示其等效阻抗值；Z_{1-6}表示線路 1-6 的阻抗值；α為線路 1-6 中母線到該線路故障點距離所占百分比。



▲圖(三十一)線路 1-6 短路等效電路圖

當配電網未接入分散式電源時：

$$I_1 = \frac{E_s}{Z_s + \alpha Z_{1-6}} \tag{24}$$

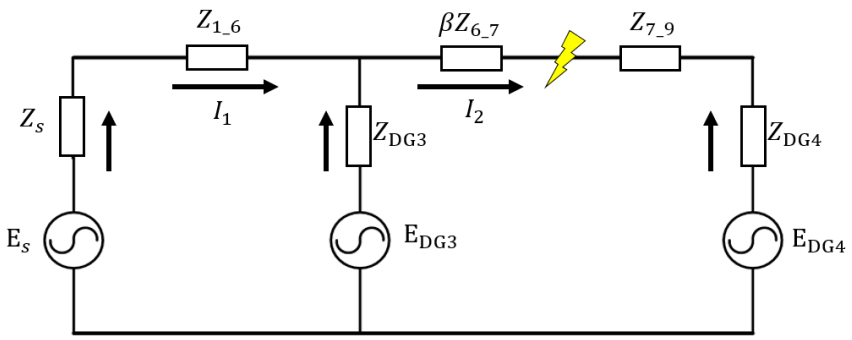
若配電網併入分散式電源時：

$$I_1{}' = \frac{E_s}{Z_s + \alpha Z_{1-6}} \tag{25}$$

比較公式(24)、公式(25)得$I_1 = I_1{}'$，所以可以得知，若短路位置發生在 DG 的上游，流經此饋線上游的短路故障電流與未接入 DG 時發生短路故障情況是相同的，故 DG 上游的保護都能正確動作切除短路故障。但由於 DG 會繼續向其輸出功率，傳統電流保護中沒有配備相應的裝置，可能導致故障點電弧不能熄滅，使得重合器不成功，導致分散式電源及其下游線路形成孤島運行狀態。

(2)DG 下游發生短路故障分析

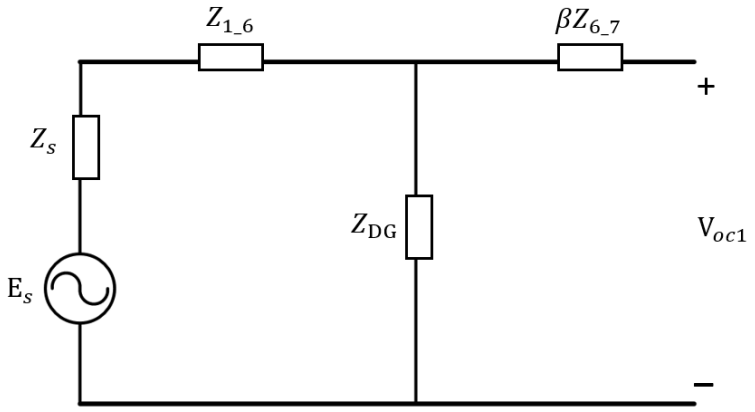
當短路故障發生在 DG 下游線路 6-7 上時(F6)，短路故障分析等效電路如圖(三十二)所示。Z_{6-7}表示線路 1-6 的阻抗值、Z_{7-9}表示線路 7-9 的阻抗值；β為線路 6-7 中母線到該線路故障點距離所占百分比。



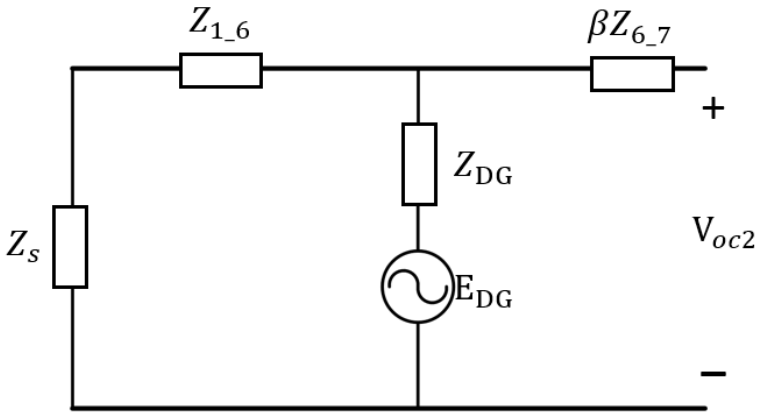
▲圖(三十二)線路 6-7 短路等效電路圖

為了分析該短路時各保護短路電流大小，採用開路電壓法與重疊原理[21]，並將圖(三十二)分成只有系統電源和只有DG_3供電時的等效電路，

如圖(三十三)、(三十四)所示。



▲圖(三十三)只有系統電源供電等效電路圖



▲圖(三十四)只有 DG 電源供電等效電路圖

由圖(三十三)、(三十四)電路疊加可知，短路點開路電壓表示為：

$$V_{oc} = V_{oc1} + V_{oc2} = \frac{E_s}{Z_s + Z_{1-6} + Z_{DG}} \times Z_{DG} + \frac{E_{DG}}{Z_s + Z_{1-6} + Z_{DG}} \times (Z_S + Z_{1-6}) \quad (26)$$

Bus 6 的等效阻抗為

$$Z_{eq} = \frac{Z_{DG} \times (Z_S + Z_{1_6})}{Z_s + Z_{1-6} + Z_{DG}} \quad (27)$$

則流經 Relay11 的故障電流為

$$I_2{}' = \frac{V_{oc}}{Z_{eq} + \beta Z_{6-7}} \tag{28}$$

流經 Relay9 的故障電流為

$$I_1{}' = \frac{E_s - \frac{V_{oc}}{Z_{eq} + \beta Z_{6-7}} \times \beta Z_{6-7}}{Z_s + Z_{1-6}} \tag{29}$$

當未接入 DG 時，流經 Relay9 與 Relay11 的故障電流為

$$I_1 = I_2 = \frac{E_S}{Z_{eq} + Z_{1-6} + \beta Z_{6-7}} \tag{30}$$

假設系統饋線上電壓大小和相位基本相同[22]，即$E_s = E_{DG}$，此時流經 Relay11、Relay9 的故障電流可以表示為：

$$I_2{}' = \frac{E_s}{\frac{Z_s + Z_{1-6}}{(1 + \frac{Z_s + Z_{1-6}}{Z_{DG}})} + \beta Z_{6-7}} \tag{31}$$

$$I_1{}' = \frac{E_s}{Z_s + Z_{1-6} + \beta Z_{6-7} \times (1 + \frac{Z_s + Z_{1-6}}{Z_{DG}})} \tag{32}$$

比較公式(30)和公式(31)可得出$I_2{}' > I_2$，即接入 DG 後流經 Relay11 的故障電流大於未接入 DG 時的故障電流。由此可知，分散式電源接入後會給下游保護提供電流，使流過下游保護的電流也增加，導致 Relay11 的靈敏性提高，保護範圍變大，嚴重時將失去選擇性。

對比公式(30)和公式(32)可得出，接入 DG 後流經上游 Relay9 的故障電流與未接入 DG 的短路故障電流相比更小。由此可知，DG 接入後會對上游保

護的故障電流起到汲取的功效，使其值變小從而降低其靈敏度，保護範圍變小，也有可能導致其拒動。

2. 自我調整電流速斷保護原理

自我調整電流速斷保護可由傳統速斷保護演變而來，自我調整電流速斷保護與階段式電流保護不同，為實現在各種運轉及故障狀態下的保護功能，其整定值的確定更加繁瑣複雜，是線上即時隨著運轉及故障狀態而改變的。自我調整電流速斷保護的整定值確定主要有以下幾步：第一步設定系統等值電勢；第二步線上採集保護安裝處的電壓、電流等數據；第三步判斷系統狀態及短路故障類型：第四步根據等值阻抗和等效電勢計算整定值[23-25]。

電流速斷保護整定公式如下：

$$I_{set} = K_k I_{kmax} = K_k \frac{E}{Z_{smin} + zl} \tag{33}$$

式(33)中，K_k表示可靠係數，通常為 1.1～1.3；E表示系統等效電勢；Z_{smin}表示最大短路電流運轉方式下的等值阻抗；z表示單位長度線路阻抗值；l表示被保護線路長度。

其保護範圍可表示為

$$\alpha = \frac{K_d(Z_{s\ min} + zl) - K_k Z_s}{K_k zl} \tag{34}$$

公式(34)中，K_d表示故障類型係數。因為K_k>1，$K_d \leq 1$，Z_s>$Z_{s\ min}$ ，

因此保護的範圍會因為K_d的變小或Z_s變大而減小。說明電流速斷保護的保護範圍嚴重依賴於系統狀態和發生的故障類型。

自我調整電流速斷保護整定公式如下：

$$I_{set} = K_d K_k \frac{R}{Z_s + \alpha zl} \tag{35}$$

公式(35)中， K_d表示故障類型參數，三相短路時取 1，兩相短路時取$\sqrt{3}/2$；K_k表示可靠係數；Z_s表示系統側阻抗；α表示故障點距保護設備的距離與線路全長比值。

其保護範圍是

$$\alpha' = \frac{zl - (K_k - 1)Z_s}{K_k zl} \tag{36}$$

由式(36)可知，系統運轉方式改變時，保護範圍也隨之改變，而且保護範圍與短路類型無關。對比式(34)及(36)，可得$\alpha' > \alpha$，即自我調整電流速斷保護相比傳統保護而言保護範圍更大，保護性能更好。

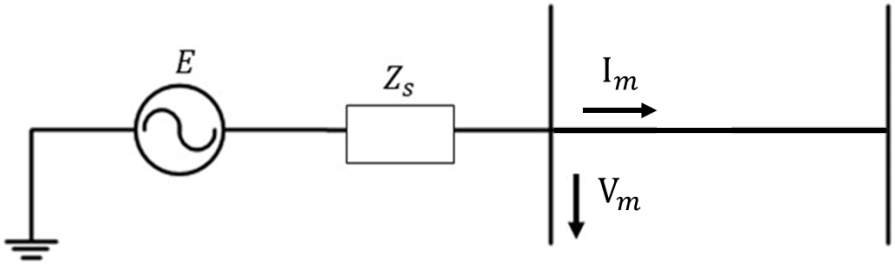
3. 自我調整電流速斷的實現

由式(35)、式(36)可知，要實現自我調整電流速斷保護的整定，需要精確獲得整定所需參數值，特別是完成等效阻抗及等效電路的計算及故障類型的快速判別。

(1)等效阻抗及等效電路

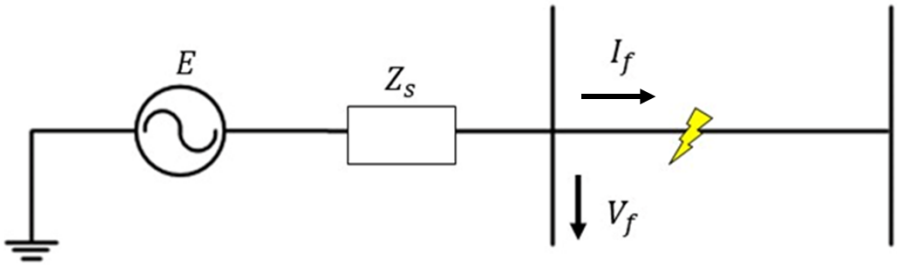
發生短路故障後，需快速計算得到系統等值阻抗Z_s，一般是通過故障分量原理來算得系統等值阻抗，具體實現方法如下：

在線性系統中，結合電路的疊加原理，故障時的狀態可以由故障前系統的狀態與故障時附加狀態疊加而成，而故障量包含於故障附加狀態。正常運行時，流經保護的電流為I_m，保護安裝處電壓為V_m，如圖(三十五)所示。



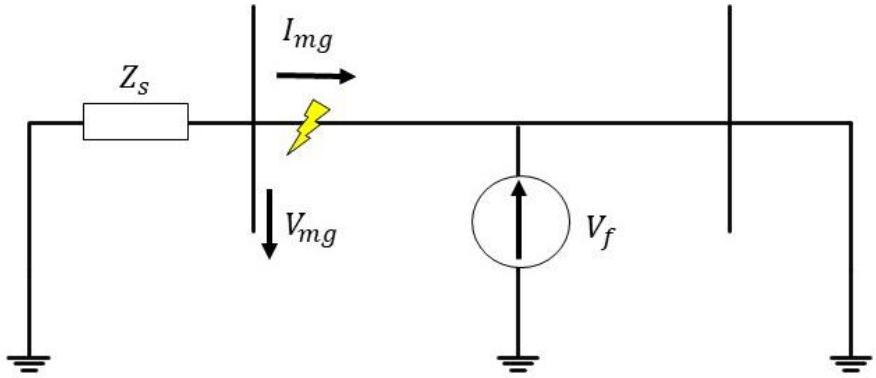
▲圖(三十五)正常運轉狀態單線圖

當有故障發生時，流過保護的故障電流表示為I_f，保護安裝處電壓為V_f，故障狀態如圖(三十六)。



▲圖(三十六)故障狀態單線圖

故障附加電流值為I_{mg}，附加電壓值為V_{mg}，如圖(三十七)。



▲圖(三十七)故障附加狀態單線圖

綜合上圖(三十五)~圖(三十七)，用故障時測量電壓值減去正常運行狀態時測量電壓值，用故障後測量電流值減去故障前所測得的電流值，即得到故障訊息附加電壓和附加電流的值，如式(37)、(38)：

$$\mathrm{V_{mg}} = V_f - V_m \tag{37}$$

$$I_{\mathrm{mg}} = I_f - I_m \tag{38}$$

由故障訊息附加電流、電壓值可得系統等值阻抗為式(39):

$$Z_s = Z_{s(1)} = -\frac{V_{mg(1)}}{I_{mg(1)}} \tag{39}$$

發生不對稱性故障時，得到故障附加狀態通常利用正序分量，所以式(39)用正序形式表示。最後利用圖(三十六)由故障狀態算得系統等效電勢為：

$$E = V_f + Z_s I_f \tag{40}$$

除利用公式(40)可以得知系統等效電路外，一般還可以提前預設 E 值的大小。

(2)故障類型的確定

在自我調整電流保護中，可以利用序分量來實現判斷快速故障類型，通常採用相電流差突變量選相算法。配電網中單相短路時，通常繼續運行 1～2 小時，並不會立即斷開故障線路。故本章節僅考慮兩相故障和三相故障情況。若無零序電流，則為非接地故障。首先獲得相電流突變量為$\triangle \dot{I}_A$、$\triangle \dot{I}_B$、$\triangle \dot{I}_C$，若 BC 兩相短路有下列關係

$$(m|\triangle \dot{I}_A| \leq |\triangle \dot{I}_B|) \cap (m|\triangle \dot{I}_A| \leq |\triangle \dot{I}_C|) \tag{41}$$

(41)式中，m 表示可靠係數，通常取 4～8。AC、AB 兩相短路有相同關係。若不滿足以上三種兩相短路故障的判斷式，則為三相短路故障。

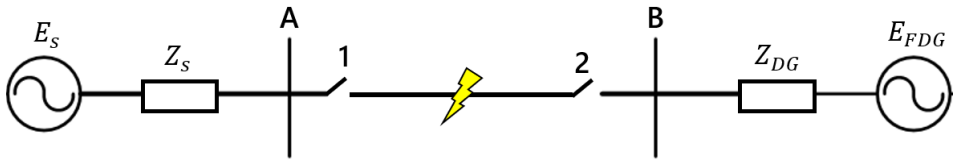
4. 自我調整電流速斷保護存在的問題

由上一小節可知，在沒有分散式電源的配電網中，自我調整電流速斷保護的保護範圍遠大於傳統電流速斷保護，但前提條件是能夠精確獲得整定公式中的各個數值。由於分散式電源的接入，將導致計算分散式電源側的等值電動勢和等值阻抗出現問題，同時故障係數也會有所不同，接下來會針對分散式電源測等效阻抗無法計算的情況與故障類型係數不確定進行分析。

(1) 分散式電源測等效阻抗無法計算

以短路點發生在分散式電源上游為例，圖(三十八)為分散式電源接入後發生故障時的等效電路圖。分散式電源可等效為電勢E_{FDG}以及阻抗

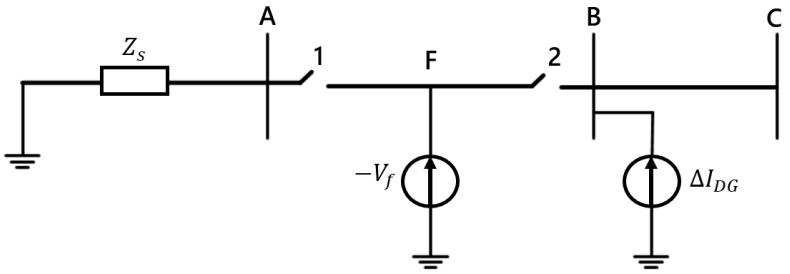
Z_{DG}。



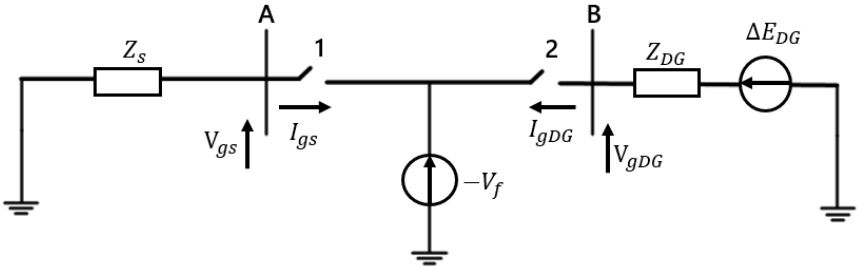
▲圖(三十八)含 DG 配電網故障等效圖

若由 PQ 控制方式的逆變型分散式電源輸出功率為定值，當圖(三十八)的短路點越靠近母線 B，短路點到逆變型分散式電源的阻抗越小，則分散式電源提供的故障電流I_{FDG}的值越大，因此I_{FDG}所對應的$E_{FDG} = I_{FDG} \cdot Z_{DG}$的值也會變大。如果短路故障位置不變，流經母線 B 點的分散式電源容量發生改變，那麼 DG 提供的電流和其等效電勢也相應發生改變。所以，在有 DG 的情況下，Relay11 背側的等值電勢不是定值，會隨著短路位置或分散式電源容量的改變而變化。接下來具體分析 DG 接入對分散式電源側及系統側的等值阻抗的影響。

首先也是系統故障狀態分成故障前運轉狀態以及故障附加狀態，故障附加狀態及其等值電路圖如圖(三十九)、(四十)



▲圖(三十九)故障附加狀態圖



▲圖(四十) 故障附加狀態等效圖

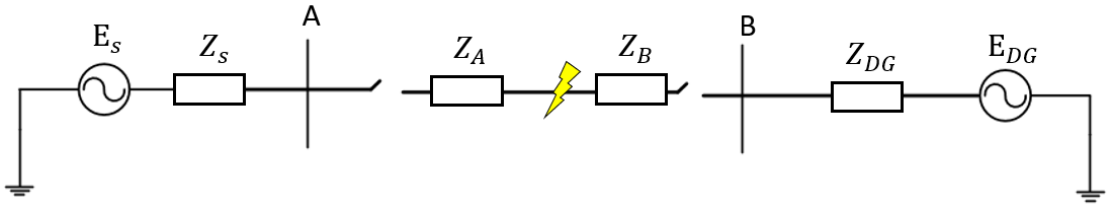
假設在正常運行狀態時，分散式電源提供的電流是I_{DG}，短路發生後 DG 提供的電流大小發生了變化如圖(三十九)中的ΔI_{DG}，表示為$\Delta I_{DG} = \Delta I_{FDG} - I_{DG}$，為故障前後 DG 輸出電流變化量。若沒有逆變型分散式電源，採用附加狀態可得保護 2 背側的等效阻抗值是$Z_{DG}{}' = \frac{-V_{gDG}}{I_{gDG}}$ ，然而實際值應該是$Z_{DG} = -(\frac{-V_{gDG}-\Delta E_{DG}}{I_{gDG}}) \neq Z_{DG}{}'$，因此採用原來的計算方式不能精確地得到分散式電源側的等效阻抗值。同樣是分散式電源側的等效電勢E_{FDG}也不能計算獲得，也就不能採用原有方式對保護完成整定工作。

至於系統電源側的等效阻抗值Z_s，由圖(四十)可知，$Z_s{}' = -V_{gs}/I_{gs} = Z_s$，即計算值與實際值相同，系統電源側等效電勢為$E_s$因此可得系統電源側的的整定不受 DG 併入的干擾,傳統計算方式依舊可以得到Z_s、E_s的值。

由上所述分析可知，若保護背側有分散式電源的接入，則保護背側的等效抗值和等效電勢無法精確獲得。因此當短路發生在分散式電源下游時，由於保護背側有分散式電源的接入，所以不能獲得保護背側的等效阻抗和電勢，無法再採用式(35)整定。

(2) 故障類型係數不確定

考慮逆變型分散式電源的特性，故障前後電源提供的電流值不同，都能用相依電源表示不同情況時 DG 提供的電流，如圖(四十一)所示。



▲圖(四十一) DG 上游故障等效電圖

發生不同的短路故障時，相依電源也會有差異，即三相短路和兩相短路故障時逆變型分散式電源提供的電流不同，所以此處不適用正序等效定則。如按式(35)進行整定計算，兩相短路電流是三相短路的$\frac{\sqrt{3}}{2}$，可能導致保護的不正確動作。

綜合上述，當故障發生在 DG 上游，由於故障前後 DG 輸出電流改變，採用現有方法無法計算保護背側有 DG 時的實際阻抗值，同時也不能得到等值電勢的值，此外故障類型係數也會改變，所以不能採用式(35)進行整定計算。

5. 改進的自我調整電流速斷保護

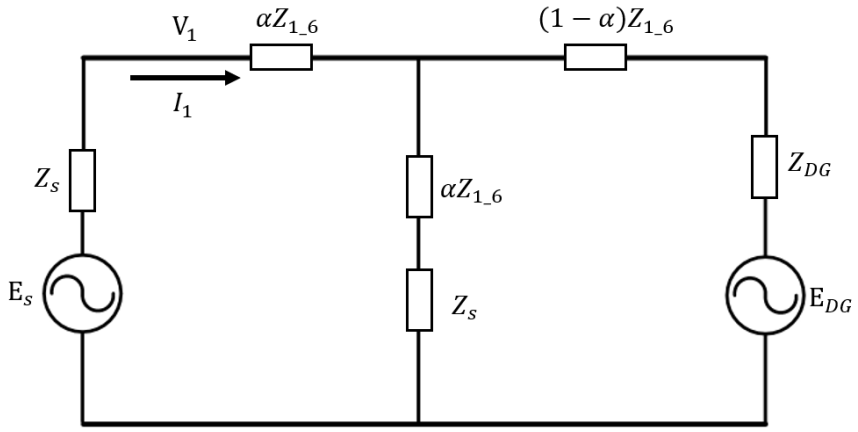
由上一小節對自我調整電流速斷保護的分析可知，需對原有保護整定方案改進，以解決有 DG 的狀態無法求得等效阻抗的問題。本小節針對不同位置發生兩相短路及三相短路故障時的特點，設置不同的保護整定方法。

(1) DG 上游發生故障保護方案

如圖(四十一)所示，在 DG 上游短路，逆變型分散式電源只存在於正序網路，等效為相依電源，所以 Relay9 的整定值因故障類型不同而不同，下面針對兩相短路及三相短路進行分析。

i. 兩相短路

兩相短路時圖(三十五)的正序網路圖如圖(四十二)，α表示短路點到 Relay9 的距離與線路總長度之比，介於 0～1 之間。



▲圖(四十二) 正序網路圖

由上圖可知，Relay9 處的電壓和電流的正序分量可由公式(42)表達：

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_s + 2\alpha Z_{1-6}} - \frac{I_{FDG}(Z_s + \alpha Z_{1-6})}{Z_s + 2\alpha Z_{1-6}} \tag{42}$$

公式(42)中，V_1表示 Relay9 處的正序電壓值，I_1為 Relay9 處的正序電流值，I_{FDG}表示 DG 的故障電流。相比系統側的正序電流，DG 輸出的電流極小[26]。I_1可表示為公式(43)：

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_s + 2\alpha Z_{1-6}} \tag{43}$$

為滿足選擇性要求，α取值為 1，則兩相短路時 Relay9 的整定公式為：

$$\mathrm{I}_{1\ set}^{(2)} = K_k \frac{V_1}{Z_s + 2Z_{1-6}} \tag{44}$$

式(44)中， K_k表示可靠係數，Z_s表示系統等值阻抗值，Z_{1-6}為線路 1-6 的阻抗值。上式中正序電壓量是隨著故障點改變而發生變化，等值阻抗Z_s任可以沿用傳統自我調整電流速斷保護的方法得到。

ii. 三相短路

當短路點為三相短路時，可得 Relay9 的正序電壓值和流經電驛的電流正序分量的公式可由式(45)表達：

$$V_1 = I_1 \times \alpha Z_{1-6} \tag{45}$$

同理，為滿足選擇性，α取上限 1，則三相短路時 Relay9 可整定為：

$$\mathrm{I}_{1\ set}^{(3)} = \frac{K_k V_1}{\alpha Z_{1-6}} \tag{46}$$

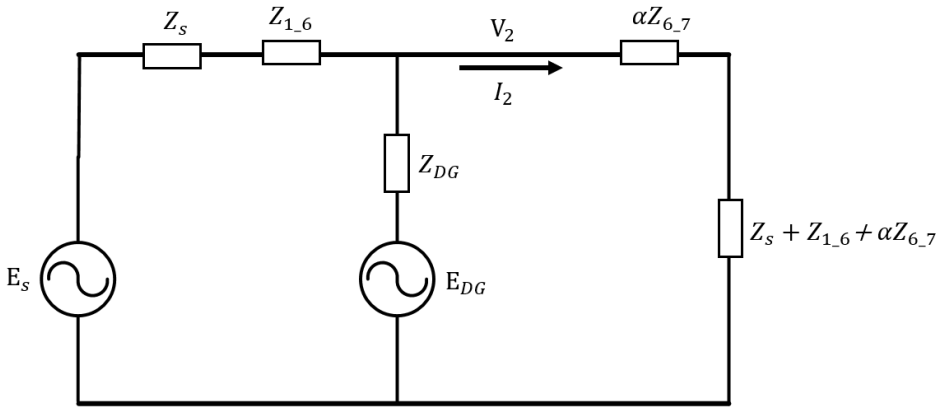
式(46)中，K_k表示可靠係數，Z_{1-6}為線路 1-6 的阻抗值。三相短路時，正序電流電壓值等於相電流電壓值。

(2) DG 下游發生故障保護方案

以圖 2-1 為例，在線路 6-7 上發生短路，由於 DG 提供的電流使傳統保護下游 Relay11 的靈敏降低、接下來將針對兩相短路和三相短路兩種情況研究自我調整電流速斷保護整定方法。

i. 兩相短路

DG 下游為兩相短路時，等效正序網路圖如下所示。



▲圖(四十三) 下游兩相短路故障正序網路圖

由圖(四十三)可得，DG 下游 Relay11 正序電壓值與正序電流之間的關係式為：

$$V_2 = I_2(Z_s + Z_{1-6} + 2\alpha Z_{6-7}) \tag{47}$$

式(47)中，V_2表示 Relay11 處的正序電壓值，I_2為 Relay11 的正序電流值，Z_{6-7}為線路 6-7 的阻抗值。

為滿足選擇性，令$\alpha = 1$，則三相短路時 Relay11 可整定為：

$$\mathrm{I}_{2\ set}^{(2)} = \frac{K_k V_1}{Z_s + Z_{1-6} + 2Z_{6-7}} \tag{48}$$

式(48)中， Z_s可透過故障附加分量求得，Z_{1-6}、 Z_{6-7}為線路抗值。DG 下游 Relay11 在兩相短路時整定值會隨著 DG 提供故障電流、兩相短路位置等而改變。

ii. 三相短路

若 DG 下游線路 6-7 某處有三相短路故障時，Relay11 的正序電壓及流

過的正序電流值存在下列公式：

$$V_2 = I_2 \times \alpha Z_{6-7} \tag{49}$$

式(49)中，V_2表示 Relay11 的正序電壓，I_2為流過 Relay11 的正序電流，三相短路時，電流電壓正序值與相電流相同。

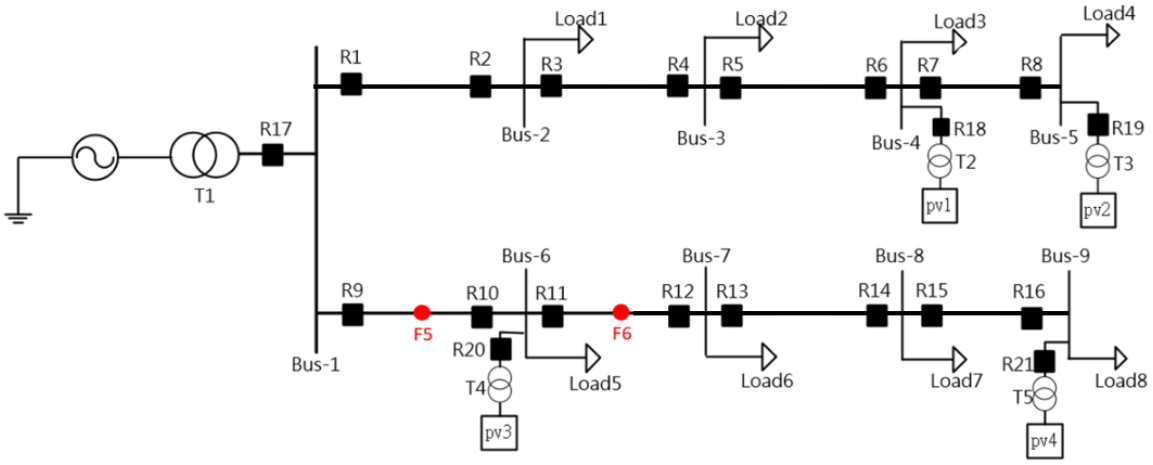
為滿足選擇性，令$\alpha = 1$，則三相短路時 Relay11 可整定為：

$$\mathrm{I}_{2\ set}^{(3)} = \frac{K_k V_2}{Z_{6-7}} \tag{50}$$

由式(50)整定得知，若下游發生三相短路，下游的保護不必再計算其背側的等效電勢及阻抗值，由於流經保護的正序電流能反映運短路位置、DG 故障電流等訊息，所以此整定方案不受到這些因素的影響。

1. DG 上下游發生故障保護模擬

延續上一章節採用配電網，如圖(四十四)所示。本次模擬皆採用三相短路故障進行模擬，分別在線路 1-6、6-7 上設置短路點 F5、F6。



▲圖(四十四)含分散式電源配配電圖

(1)當三相短路發生在線路 1-6 上時，設置短路點 F5 距 Bus1 為

αZ_{1-6}，α取值分別為 50%、80%、90%，K_k取 1.3。模擬結果比較如表(31)。

表 10 三相故障點在 DG 上游模擬結果

α	測量電流(kA)	自我調整電流速斷保護整定值(kA)
50%	5.939	5.548
80%	5.819	5.721
90%	5.792	5.851

由表(10)可知，短路距離越遠時，測量的電流越小。而在線路 50%、80%短路時，測量值均大於整定值，保護動作；但在 90%處短路時，測量值小於整定值，保護不動作。所以自我調整電流速斷保護的整定值能隨著短路位置的變化而自我調整，但保護範圍不到線路全長 90%。

(3) 三相短路發生在線路 6-7 上時，設置短路點 F6 距 Bus6 為αZ_{6-7}，α取值分別為 50%、80%、90%。模擬結果比較如表(11)

表 11 三相故障點在 DG 上游模擬結果

α	測量電流(kA)	自我調整電流速斷保護整定值(kA)
50%	7.633	7.304
80%	7.54	7.416
90%	7.476	7.53

由表(11)可知，與線路 1-6 短路情況相同，在線路 90%處無法動作，

保護範圍小於 90%。理論上自我調整電流速斷保護範圍恆為 84%，實際模擬則會在理論值附近波動，不會越級至下一段線路。

參、結論

隨著對環保、政策規劃與用電安全可靠等要求的提高，將有越來越多的分散式電源併入電網。但由於分散式電源的的併入，將改變配電網的結構，導致原有保護可能不再適用。本計畫的研究目的即是提出解決含分散式電源的配電網中保護不正確動作的改善方案，而本計畫所做的研究工作總結如下:

第二章第一節為探討具逆變器分散式電源接入對配電網狀態估測的影響，以核研所提供所內具 PV 的兩饋線微電網為例，比對 OpenDSS 與實際量測值。當再生能源發電系統運轉功率因數未維持在單位功因時，會使配電線路電壓有較大的變動(上升)。經比較，可發現當太陽光伏併網產生虛功時，配電網因受虛功影響，使得在母線上測量到的電壓值皆提高。同時模擬了台電饋線系統進行具逆變器分散式電源接入對配電網狀態估測的影響，可以觀察到在母線上因具負載或是併再生能源的影響，使得量測值與實際值產生了些微誤差。

第二章第二節為含分散式電源配電網故障電流模擬，搭建了一個含分散式電源配電網，利用 MATLAB/Simulink 及 EMTP-RV 相互驗證故障電流的計算大小，並比較兩個軟體建模可能產生的差異。其中最大誤差值發生在分析三相平衡故障時，誤差值為 12.01%。也說明了造成此誤差的原因是因為

這兩套軟體對於 PV 中變流器的控制方式、以及功率設定方式的不相同而造成誤差。

第二章第三節探討了含分散式電源之配電系統保護方式與解析。配電網保護系統的設計是當今面臨的主要技術挑戰之一，保護系統必須能夠響應公用電網的所有故障。因此在這個章節先提出了配電網保護相關的問題，再介紹配電保護系統的設計標準“3S”的準則。最後說明了三種配電系統保護方式。

第二章第四節為 DG 接入配電網不同位置時對配電網過電流保護之解析，針對含 DG 的配電網始端，中間以及末端母線的情況，建立故障等效電路，透過等效電路與計算故障電流公式，觀察出流過各保護的短路電流大小的變化並不相同，代表當 DG 在配電網不同位置時，對不同的保護的影響是不同的。

第二章第五節為基於提前計算整定值的自我調整保護，提出了基於提前計算和可信的整定值組來進行配電網動態自我調整電流速斷保護設計的步驟，也討論了另一種基於即時計算整定值的自我調整電流速斷保護的設計方案。

第二章第六節為不同節點狀態下，動態保護協調案例分析。透過假設一個情境為配電網之間的電纜由於維護工作而斷開，觀察故障電流與電驛預期跳脫延時，觀察過電流保護的跳脫曲線可以得知電驛跳脫順序。提到

此模擬系統中的過電流電驛整定可能會影響連接在配電盤上的慣性時間常數較小的分散式電源的穩定性。可行的解決方案是基於自我調整的方向性聯鎖，將配電網中有過電流電驛的時間延時整定為 50ms，這將能避免配電網中分散式電源或者正常部分不必要的斷開。也提到孤島時主電網對故障電流沒有貢獻，為了實現快速隔離故障，跳脫曲線必須能根據配電網的拓撲和連接的分散式電源的數量動態地向左移動。

第二章為自我調整電流速斷保護原理，分析研究了自我調整電流速斷保護的原理及其在含 DG 配電網中應的問題後，利用傳統方法無法獲得保護背側有 DG 時的等值阻抗及電勢，無法實現自我調整電流速斷保護。然後通過分析 DG 上下游短路時故障等值正序網絡圖，通過計算正序電流實現保護自我調整電流速斷整定。並模擬證明該方案能根據短路位置的改變而自我調整定值。在傳統電流速斷保護已經失去選擇性，故本計畫提出的自我調整電流速斷保護效果更佳。

參考文獻

[1] W. Feero, D. Dawson, J. Steven, “Protection Issues of Microgird Concept,”https://fidvr.lbl.gov/sites/all/files/certs-protection-issues-microgrid.pdf

[2]孫景釘，分佈式發電條件下配電系統保護原理研究，天津大學，2010。

[3]孫景釘，李永麗，李盛偉等，含分佈式電源配電網保護方案，電力系統自動化，33 (1)，pp 81-84，2009。

[4]張青傑，陸於平，基於故障相關區域自我調整分的分佈式保護新原理[J].電力系統自動化，32(7)，35-43，2008。

[5] S. Brahma, A. Girgis, “Development of Adaptive Protection Scheme for Distribution System with High Penetration of Distributed Generation,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 1, pp. 1-8, 2009.

[6]EPRI, “Overview of SEMI F47-0706”, 2006.

[7] ABB SACE SpA, “Low voltage moduled case circuit breakers Tmax,” Product brochure, 2007.

[8] ABB SACE SpA, “DOC simulation tool,” User manual version 1.0, 2008.

[9] IEEE Standard for Inverse Time Characteristics Equations for Overcurrent Relays

[10] Department of US Army (1991), Coordinated power systems protection. Technical manual, TM 5-811-14 [online]. Retrieved from http://www.usace.army.mil/publications/armytm/tm5- 811-14/

[11] IEEE Std 242-1986, Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems,

[12]李鵬，竇鵬衝，李雨薇等，微電網技術在主動開關網中的應用，電力自動化設備，35（4），pp. 8- 16，2015。

[13]馬靜，土希，米超等，含分佈式電源的配電網自我調整電流速斷保護新方案，電網技術，35（10），pp. 204-208，2011。

[14]張保會，尹項根，電力系統繼電保護，北京中國電力出版社, pp. 24-30，2005。

[15] F. Razavi, H.A. Abyaneh, M. Al-Dabbagh, et al., “A new comprehensive

genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination," Electric Power Systems Research, vol. 78, no. 4, pp. 713-
720, 2008.
[16]郭煜華，姜軍，范春菊等,改進的交換網反時限過電流保，電力自動化設備, vol. 35, no. 10, pp. 45-50, 2015.
[17] IEEE C37.112-1996 - IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays
[18] H.H. Zeineldin, H.M. Sharaf, D.K. IBRAHIM, Optimal protection coordination for meshed distribution systems with DG using dual setting directional over current relays, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 1, pp. 115-123, 2014.
[19] P. Ray, M. Biswal, Microgrid: Operation, Control, Monitoring and Protection, Springer, Singapore, 2020.
[20] https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html
[21]邱關源，羅先覺，電路(第五版)，高等教育出版社，2006.
[22]李娟，有源配電網電流差動保護原理與實現技術研究，山東大學，
2016.
[23]孫景訂，李麗，李盛體，金強，含分佈式電源配電網保護方案門.電力系統自動化，33 (1), pp. 81-84, 2009.
[24]張青傑，陸於平，基於故障相關區域自我調整劃分的分佈式護新原理,電力系統自動化, 32(7), pp. 39-43, 2008.
[25] S.M. Brahma, A.A. Girgis, Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration of distributed generation. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 1, pp. 56-63, 2004.
[26] 張潤坤，王寶華，含低電壓越型光伏電源配電網自我調整正序電流速斷保護，電力系統保護與控制, 45(18), pp. 137-142, 2017.