







# 公告本

I653798

## 【發明摘要】

【中文發明名稱】固態故障電流限制器及系統

【英文發明名稱】SOLID STATE FAULT CURRENT LIMITER AND  
SYSTEM

【中文】一種固態故障電流限制器及系統，固態故障電流限制器包含電流分離電抗器，電流分離電抗器包括系統電流輸入端、無源電流輸出端以及控制電流輸出端。電壓控制電抗器包含第一端部以及第二端部，第一端部耦合到控制電流輸出端上並且第二端部耦合到無源電流輸出端上。故障電流觸發電路與電壓控制電抗器並聯耦合，並且經配置以在由系統電流輸入端接收的故障電流超出預定觸發電流時斷開。瞬態電壓控制電路與電壓控制電抗器並聯耦合以接收故障電流。

【英文】A solid-state fault current limiter and system are provided. The solid-state fault current limiter includes a current splitting reactor, comprising a system current input, a passive current output and a control current output. A voltage control reactor includes a first end and a second end, the first end coupled to the control current output and the second end coupled to the passive current output. A fault current trigger circuit coupled in parallel with the voltage control reactor and configured to open when a fault current, received by the system current input, exceeds a predefined trigger

current. A transient voltage control circuit coupled in parallel with the voltage control reactor to receive the fault current.

【指定代表圖】圖2A。

【代表圖之符號簡單說明】

200：SSFCL

202：電流分離電抗器

204：第一導電繞組

206：第二導電繞組

208：電壓控制電抗器

210：故障電流觸發

N1、N2：匝數

$I_{W1}$ ：第一分量

$I_{W2}$ ：第二分量

$I_{FTC}$ ：電流

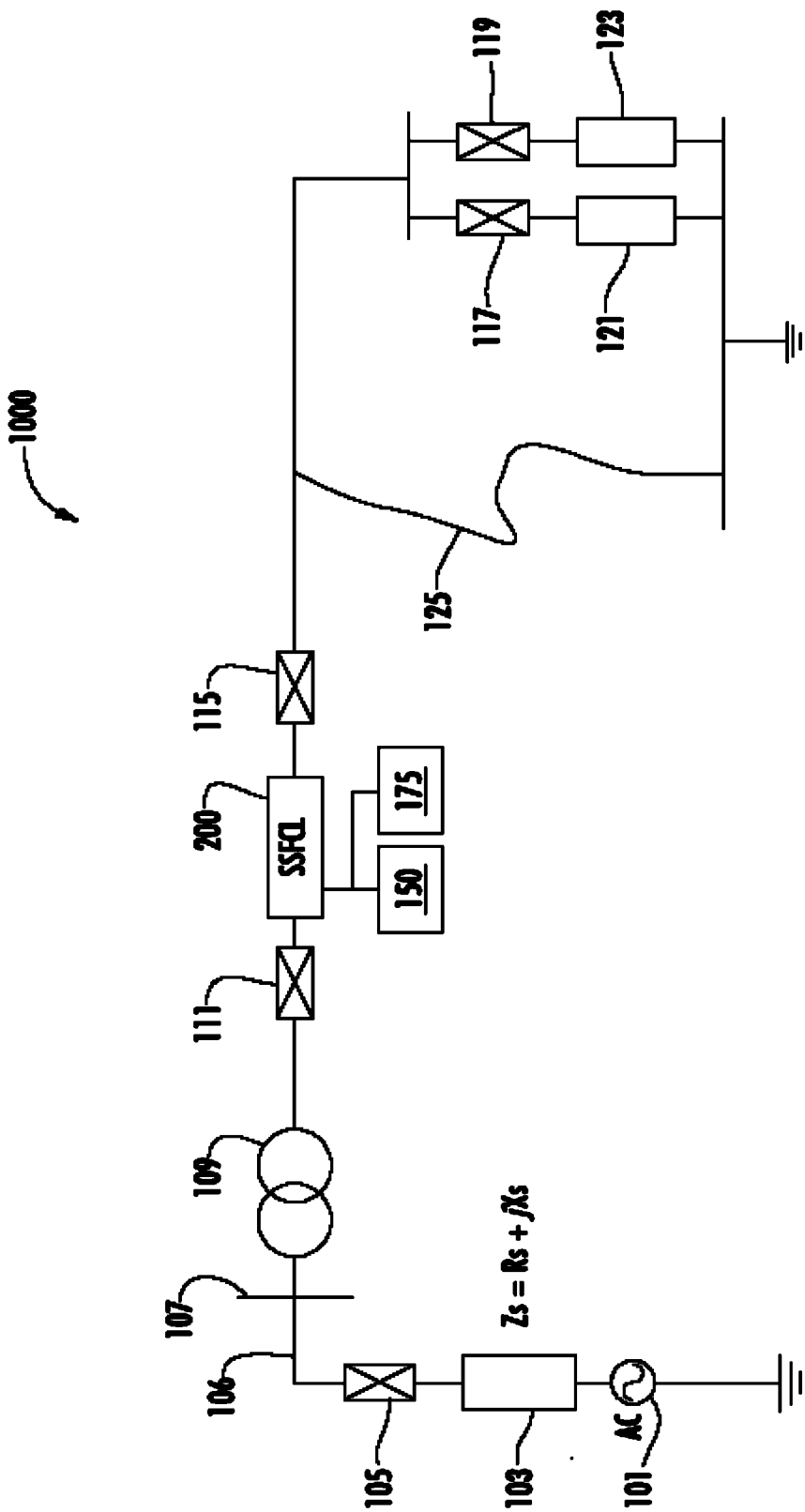
$I_{VCR}$ ：電流

$I_T$ ：系統電流

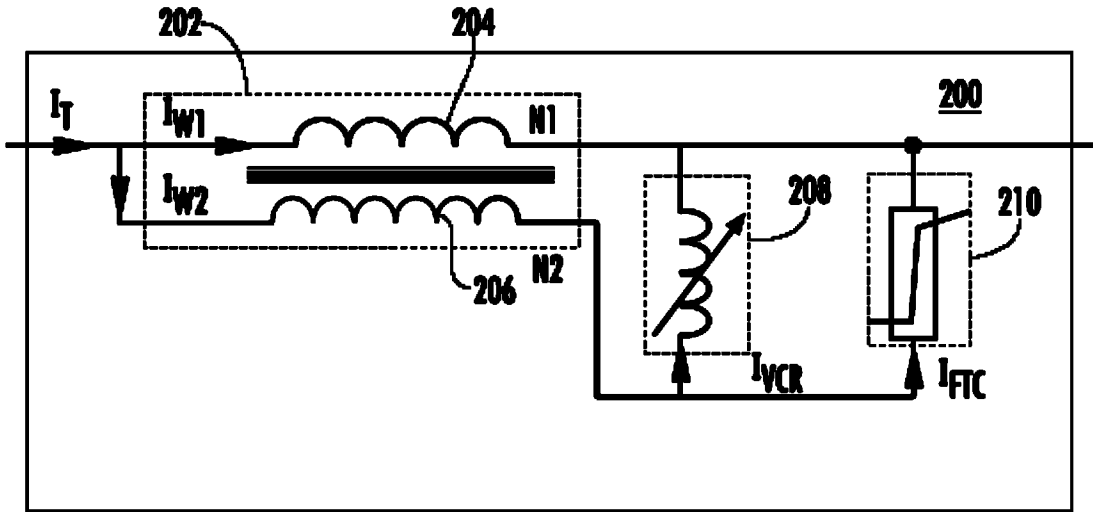
【特徵化學式】

無

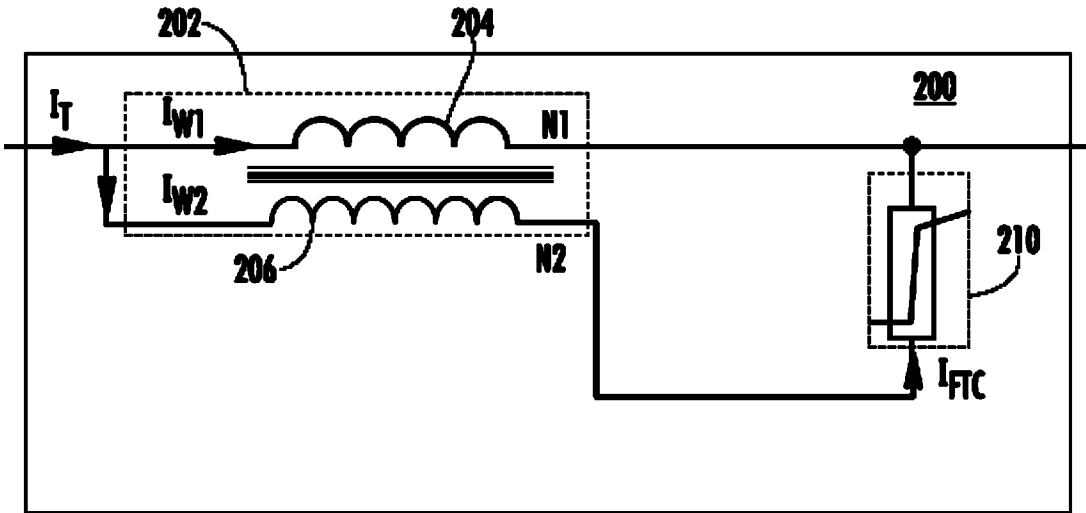
【發明圖式】



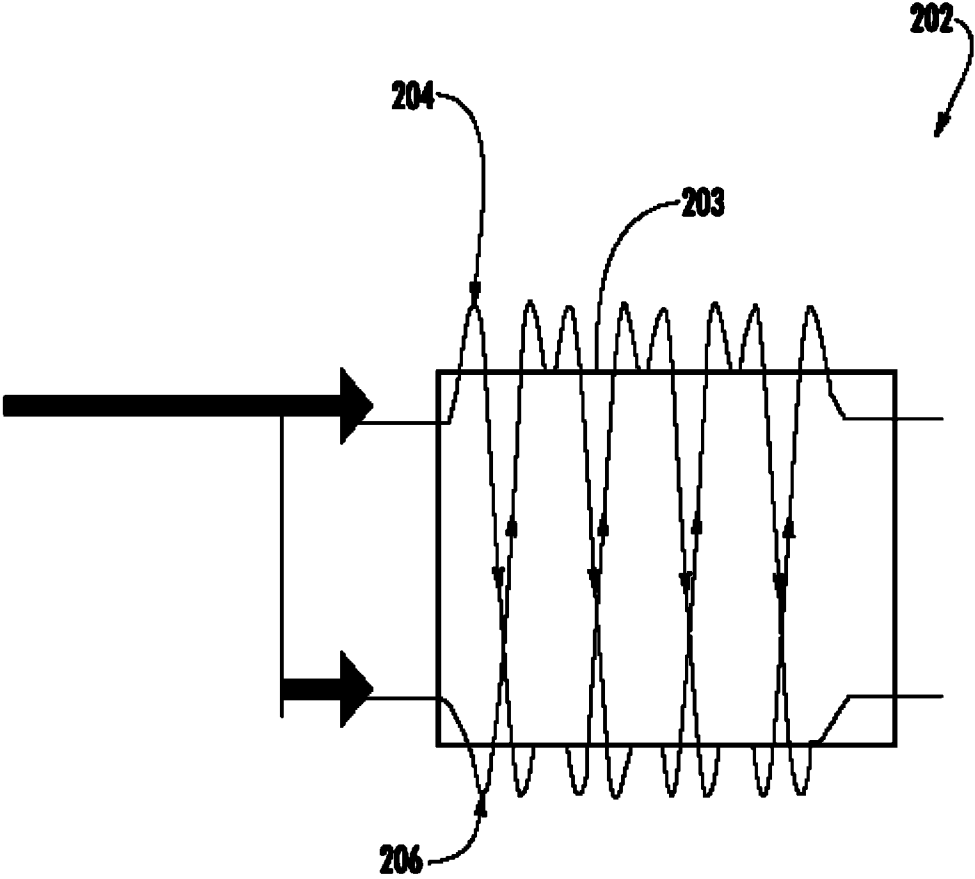
【圖1】



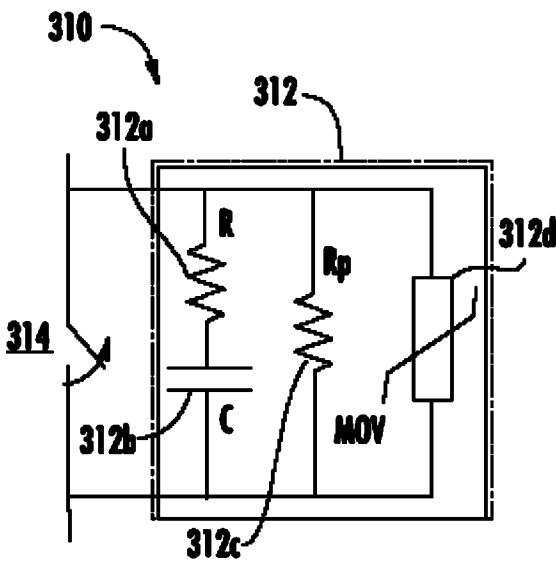
【圖2A】



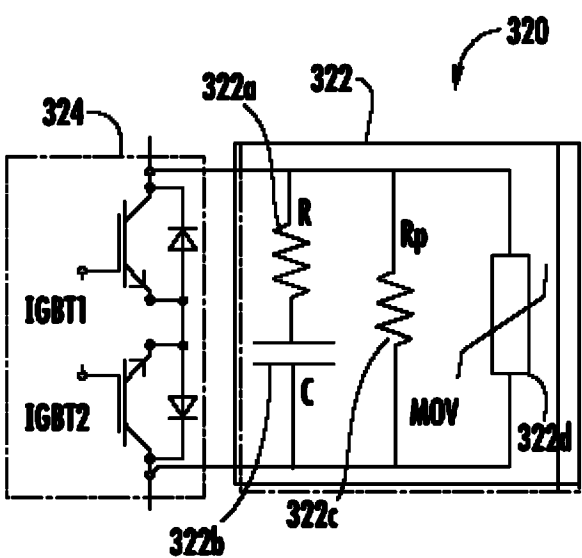
【圖2B】



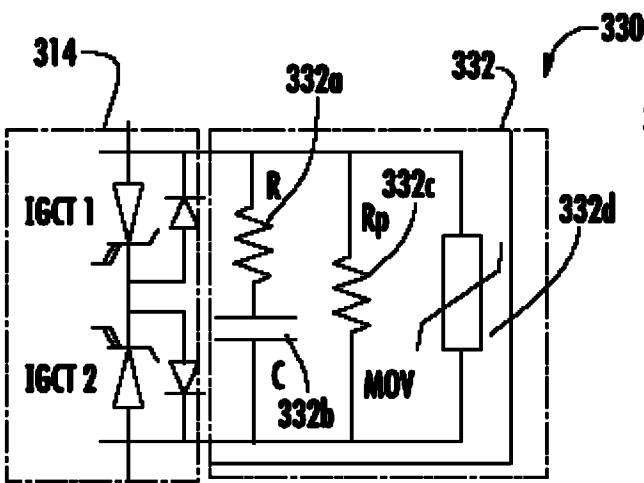
【圖2C】



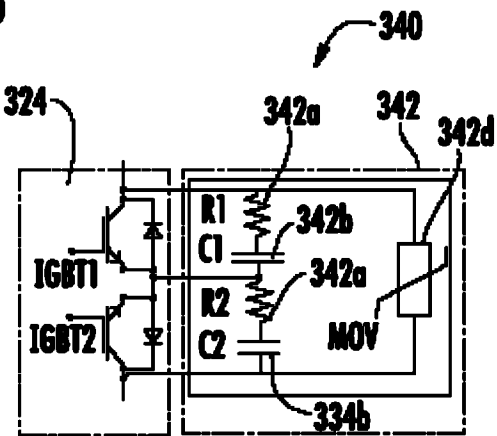
【圖3A】



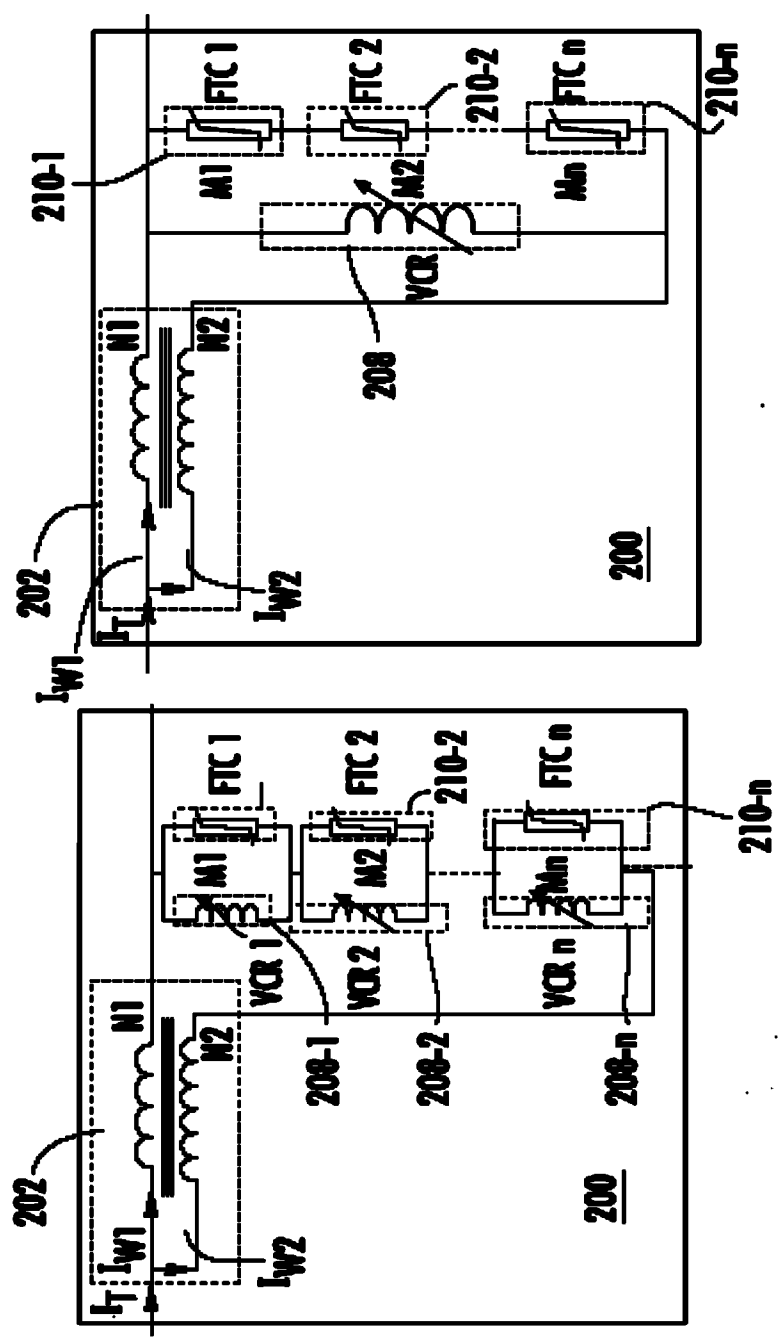
【圖3B】



【圖3C】

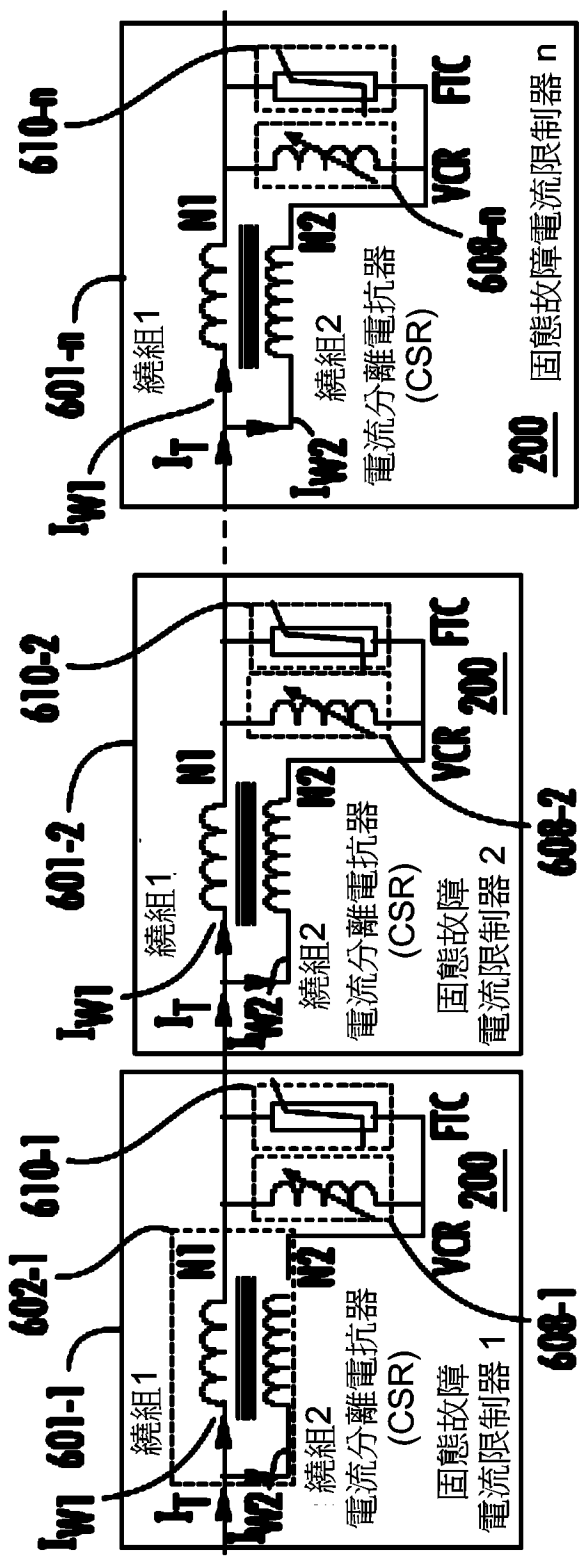


【圖3D】

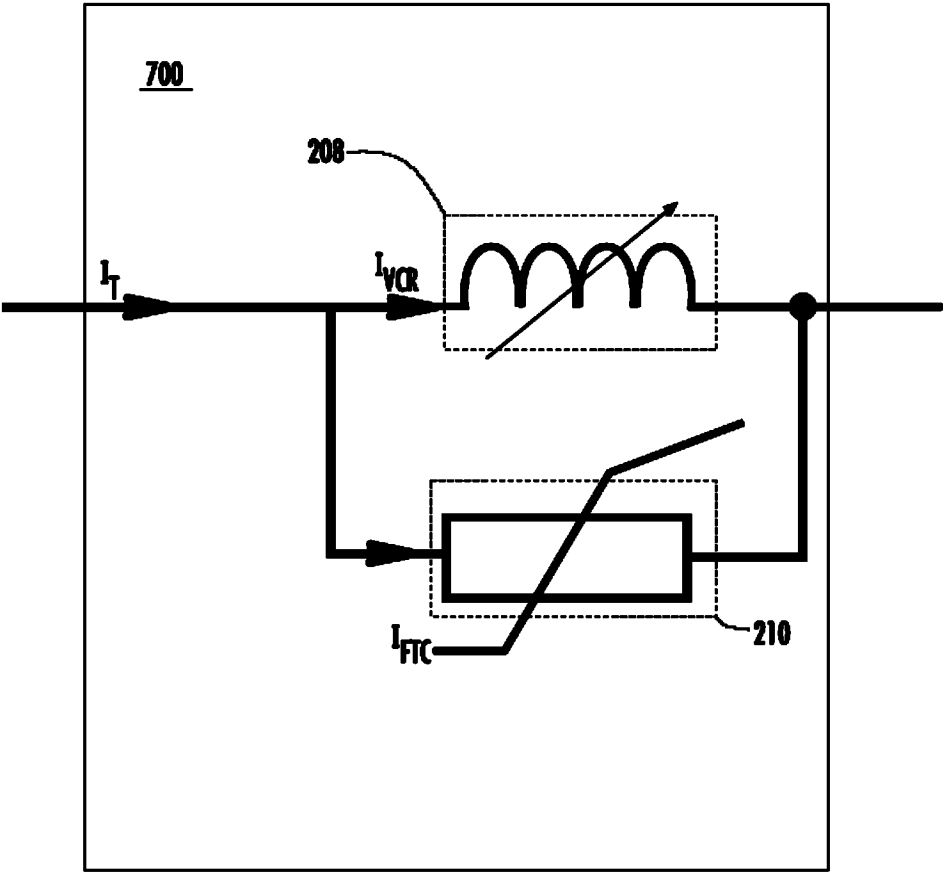


【圖5】

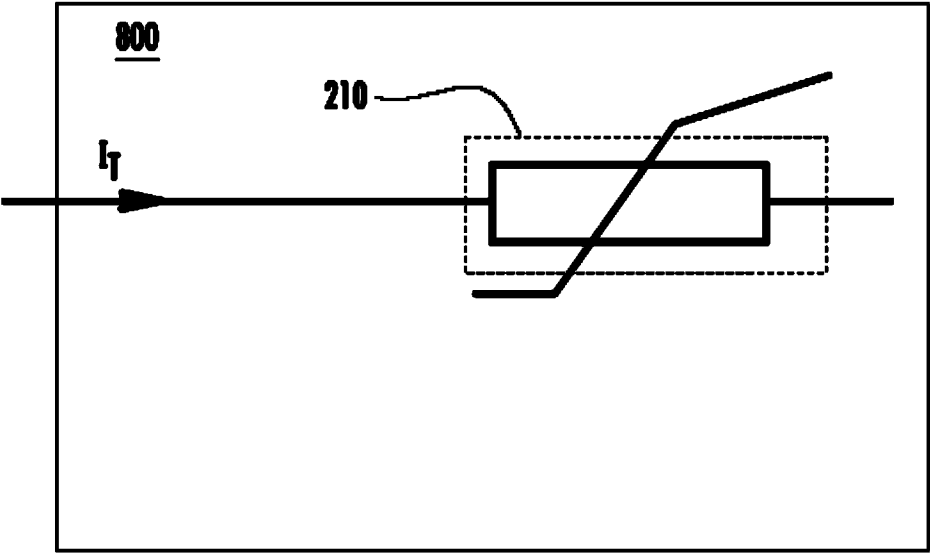
【圖4】



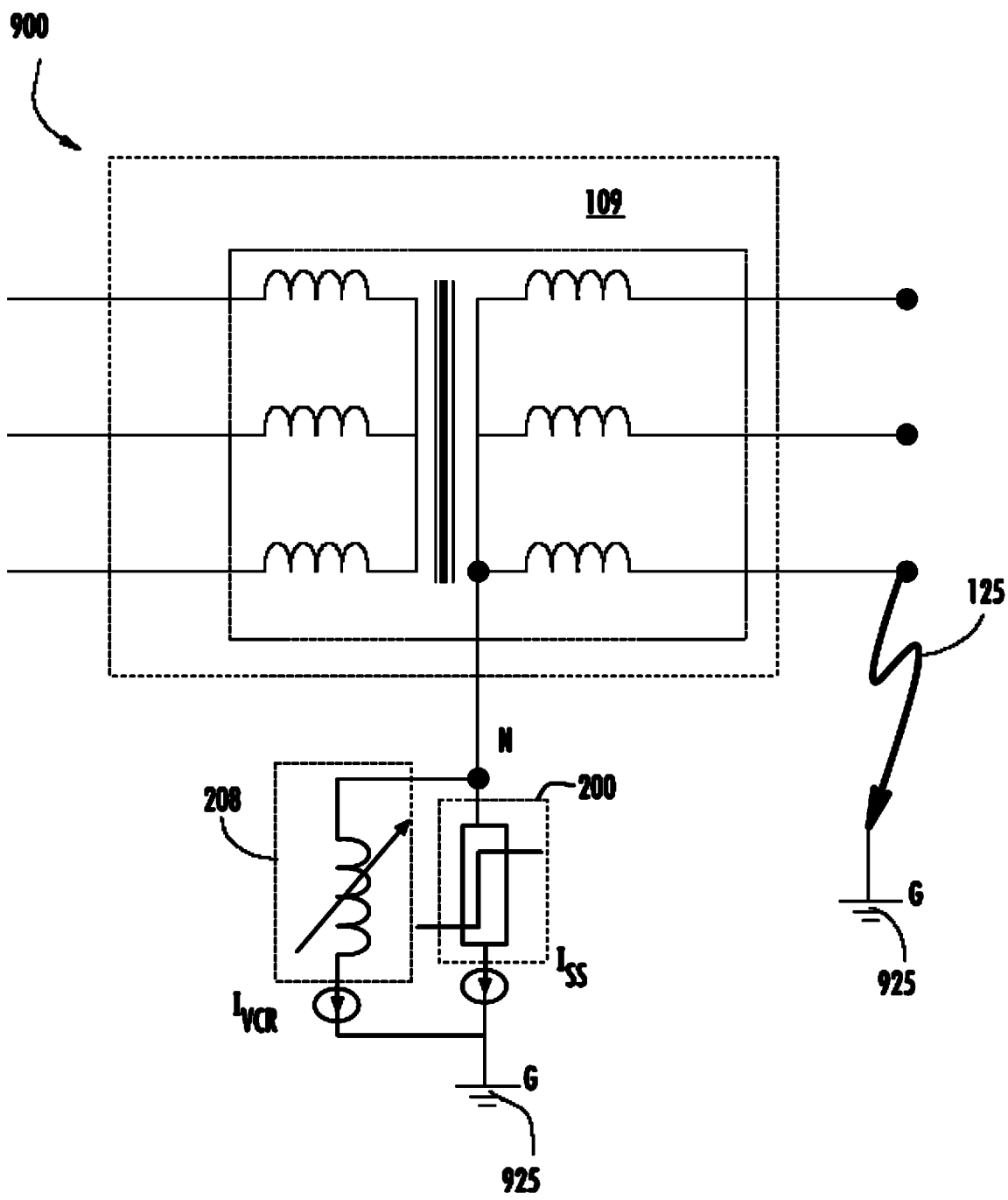
【圖6】



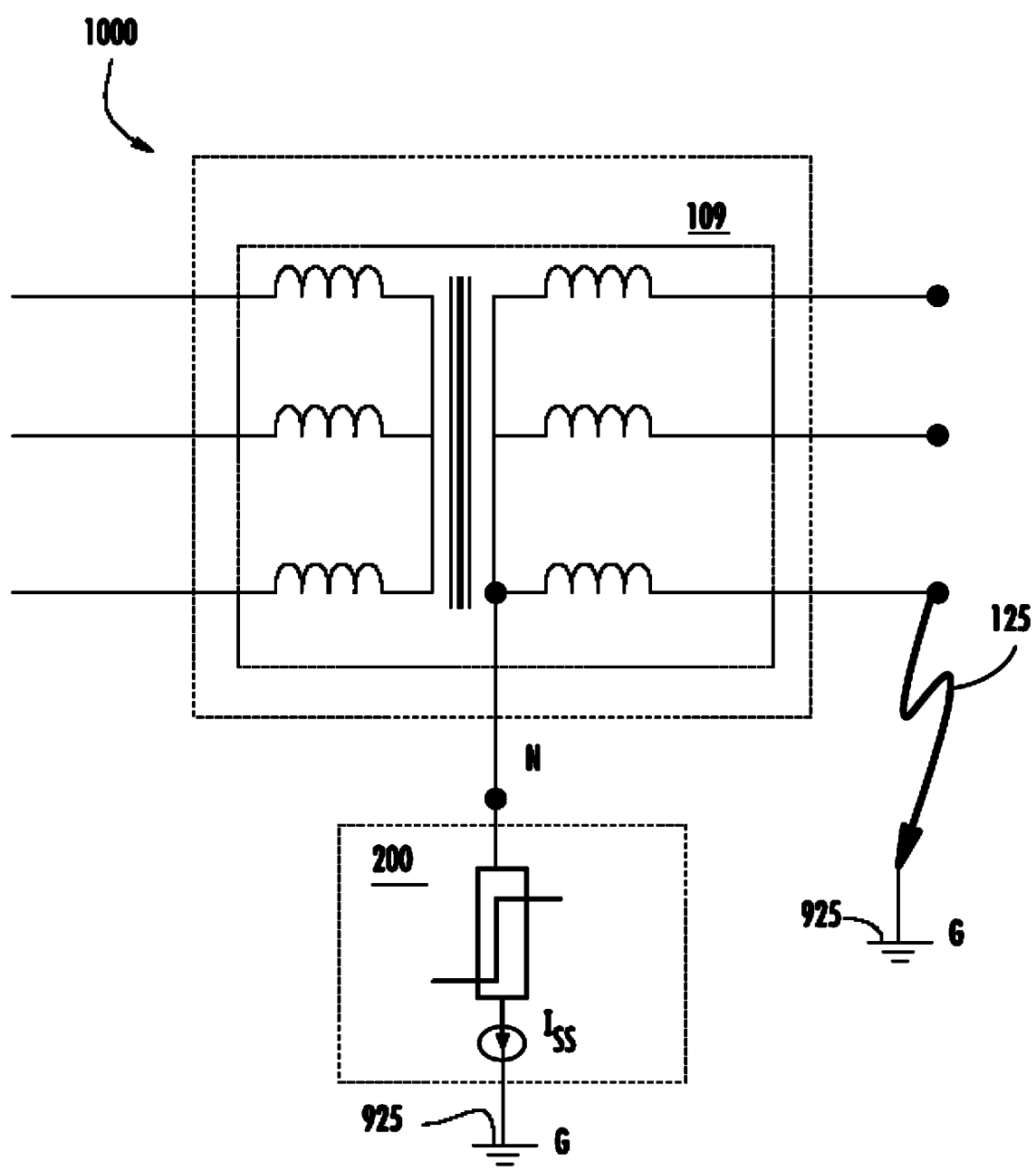
【圖7】



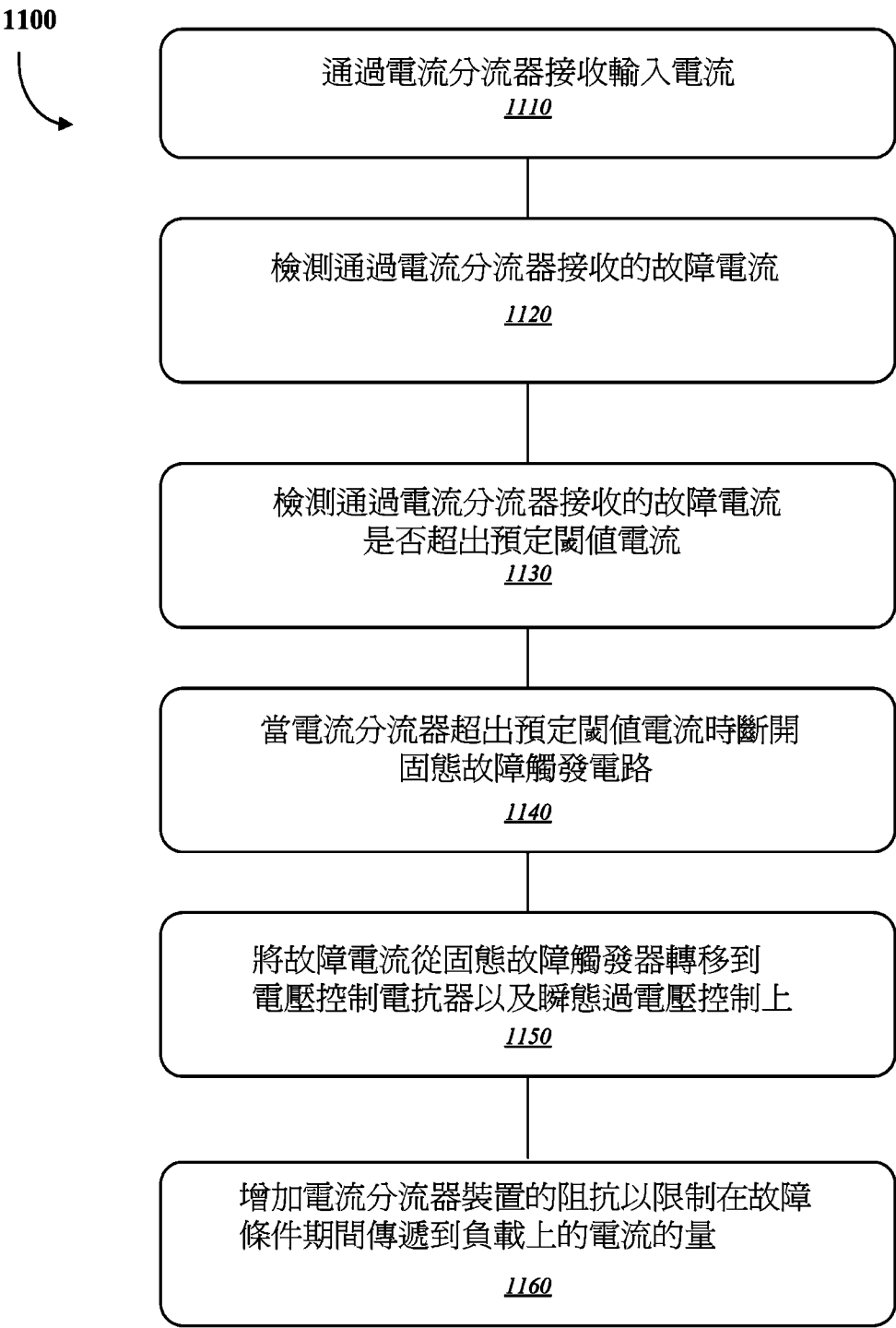
【圖8】



【圖9】



【圖10】



【圖11】

## 【發明說明書】

【中文發明名稱】固態故障電流限制器及系統

【英文發明名稱】SOLID STATE FAULT CURRENT LIMITER AND  
SYSTEM

### 【技術領域】

【0001】 本發明是有關於一種電流控制裝置，且特別是有關於一種故障電流限制裝置和系統。

### 【先前技術】

【0002】 故障電流限制器（FCL）用以提供保護，防止（例如）在輸電網絡和配電網路中的電流浪湧。在過去幾十年中已經研發了各種類型的 FCL，包含超導故障電流限制器（SCFCL）、電感故障電流限制器以及在所屬領域中所熟知的其它種類。實施 FCL 的供電系統可以包含用以為各種工業、商業和/或住宅電力負載發電並送電的發電、輸電以及配電網路。

【0003】 故障電流是可能由系統中的故障（例如，短路）引起的電力系統中的異常電流。由於任何數目個事件或故障，例如電源線或其它系統元件被惡劣的天氣（例如，閃電）破壞，可能在系統中出現故障電流。當出現此類故障時，在電路中可能暫態呈現大的負載。作為回應，網路向負載輸送大量電流（即，故障電流）。此電流的浪湧是不需要的，因為電流的浪湧可能破壞是（例如）

網路自身或連接到網路上的設備的負載。FCL 裝置存在的問題是其成本、複雜度以及大小。正是關於這些以及其它考量，提供進行本發明的改良。

### 【發明內容】

【0004】 提供此概述，以簡化形式引入下文在具體實施方式中進一步描述的概念選擇。此概述並不意圖確定所主張的標的物的關鍵特徵或基本特徵，也不意圖被用作輔助確定所主張的標的物的範圍。

【0005】 本發明提供一種固態故障電流限制器，所述固態故障電流限制器包含電流分離電抗器，所述電流分離電抗器包括系統電流輸入端、無源電流輸出端以及控制電流輸出端。電壓控制電抗器包括第一端部以及第二端部，第一端部耦合到控制電流輸出端上並且第二端部耦合到無源電流輸出端上。故障電流觸發電路與電壓控制電抗器並聯耦合，並且經配置以在由系統電流輸入端接收的故障電流超出預定觸發電流時斷開。瞬態電壓控制電路與電壓控制電抗器並聯耦合以接收故障電流。

【0006】 在一個實施例中，提供固態故障電流限制器，所述固態故障電流限制器具有系統電流輸入端、無源電流輸出端以及控制電流輸出端。電壓控制電抗器包括第一端部以及第二端部，第一端部耦合到控制電流輸出端上並且第二端部耦合到無源電流輸出端上。故障電流觸發電路與電壓控制電抗器並聯耦合，並且經配

置以在由系統電流輸入端接收的故障電流超出預定觸發電流時斷開。瞬態電壓控制電路與電壓控制電抗器並聯耦合以接收故障電流。

【0007】 在一個實施例中，提供固態故障電流限制器系統，所述固態故障電流限制器系統具有電流分離裝置，所述電流分離裝置包括繞芯捲繞的第一導電繞組和第二導電繞組，其中第一導電繞組經配置以在故障狀態期間承載通過第一導電繞組以及第二導電繞組二者的故障電流；電壓控制電抗器，所述電壓控制電抗器耦合到電流分離裝置上；瞬態電壓控制電路，所述瞬態電壓控制電路與電壓控制電抗器並聯耦合；以及固態故障觸發電路，所述固態故障觸發電路與電壓控制電抗器並聯耦合。固態故障觸發電路經配置以在行進穿過第二導電繞組的故障電流高於預定閾值電流時斷開，並且電壓控制電抗器以及瞬態過電壓控制經配置以在固態故障觸發電路斷開時接收第二導電繞阻產生的故障電流。

【0008】 在一個實施例中，提供固態故障電流限制器系統，所述固態故障電流限制器系統具有電流分離裝置，所述電流分離裝置包括繞芯捲繞的第一導電繞組和第二導電繞組。第一導電繞組經配置以在故障狀態期間承載通過第一導電繞組以及第二導電繞組二者的故障電流。多個串聯連接的電壓控制電抗器和故障觸發電路模組可以耦合到電流分離裝置上，其中多個串聯連接的電壓控制電抗器和故障觸發電路模組中的每一者包含與故障觸發電路並聯連接的電壓控制電抗器。

**【圖式簡單說明】**

**【0009】** 為了便於更全面地理解本發明，現在參考附圖，其中相同的元件用相同的標號來參考。這些附圖不應解釋為限制本發明，而是既定僅為示例性的。

圖 1 是根據本發明的實施例的在輸電或配電系統中的故障電流限制器（FCL）的應用。

圖 2A 是在根據本發明的實施例的輸電系統中使用的 FCL 電路。

圖 2B 是在根據本發明的實施例的輸電系統中使用的 FCL 電路。

圖 2C 圖示根據本發明的實施例的具有繞芯捲繞的第一導電繞組和第二導電繞組的 FCL 電路。

圖 3A 圖示根據本發明的實施例的使用電磁開關或保險絲的故障電流感測開關（FCSS）。

圖 3B 圖示根據本發明的實施例的使用 IGBT 以及二極體的 FCSS。

圖 3C 圖示根據本發明的實施例的使用 IGCT 以及二極體的 FCSS。

圖 3D 圖示根據本發明的實施例的使用 IGBT 以及二極體的 FCSS。

圖 4 圖示根據本發明的實施例的使用串聯連接的電壓控制電

抗器（VCR）以及故障觸發電路（FTC）模組的 FCL。

圖 5 圖示根據本發明的實施例的使用串聯連接的 FTC 模組的 FCL。

圖 6 圖示根據本發明的實施例的使用串聯連接的 FCL 模組的模組化 FCL。

圖 7 圖示根據本發明的實施例的不包含電流分離電抗器的 FCL 電路。

圖 8 圖示根據本發明的實施例的在閃光電弧保護中使用的不包含電流分離電抗器或電壓控制電抗器的 FCL 電路。

圖 9 圖示根據本發明的實施例的在變壓器的中性點接地中使用以限制相對地(phase-to-ground)故障的具有電壓控制電抗器的 FCL 電路。

圖 10 圖示根據本發明的實施例的在需要抑制接地故障電流的情況下在變壓器的中性點接地中使用以限制相對地(phase-to-ground)故障的具有電壓控制電抗器的 FCL 電路。

圖 11 圖示根據本發明的實施例的固態故障電流限制器系統的操作方法。

## 【實施方式】

【0010】 現將在下文中參考附圖更全面地描述本發明的各實施例，附圖中示出了一些實施例。本發明的標的物可以以許多不同形式體現並且不應被解釋為限於本文所闡述的實施例。提供這些實施例是為了使得本發明將是透徹並且完整的，並且這些實施例

將把標的物的範圍完整地傳達給所屬領域的技術人員。在圖式中，相同標號始終代表相同元件。

【0011】 實施例提供了使用電流分離耦合電抗器設計的固態故障電流限制器（“SSFCL”）。有利地的是，與機械操作的故障電流限制器相比，SSFCL 能快速跳閘並且隔離短路故障。SSFCL 能夠使正弦故障電流的第一週期峰值（例如，對於 60 Hz 電源，第一峰值為約 4ms 到 10ms）減少至少 25%到 75%。圖 1 到 12 圖示了在任何電路（例如，輸電、配電以及發電網路）中限制短路故障電流的 SSFCL 的基本操作原理。

【0012】 圖 1 圖示了可以在輸電和配電系統中實施的包含固態故障電流限制器（SSFCL）200 的示例性故障電流限制器系統 1000。電源 101 通過介面電路 103 以及電路斷路器 105 供電，介面電路 103 具有包括有功分量  $R_s$  和無功分量  $X_s$  的複阻抗  $Z_s$ 。輸電線 106 導向具有變電站的介面 107，變電站具有經配置以將傳輸線電壓步進到與負載 121、123 相容的電壓的變壓器 109。變壓器 109 的輸出端可以耦合到電路斷路器 111 和 SSFCL 200 上。SSFCL 200 可以通過電路斷路器 115 和匹配電路 117、119 耦合到負載 121、123 上。可以設置其它負載和匹配電路。短路故障 125 可能存在，並且若存在，將通過本文所描述的各種實施例的操作來隔離。

【0013】 圖 2A 到 10 圖示了可用作圖 1 中示出的 SSFCL 200 的故障電流限制器的各種實施例。具體來說，圖 2A 圖示了包含電流分離電抗器（CSR）202 以及與故障電流觸發（FTC）電路 210 並聯

的電壓控制電抗器 (VCR) 208 的 SSFCL 200。短暫地轉向圖 2A，CSR 202 包含圍繞磁芯 203 的第一導電繞組 204 和第二導電繞組 206。第二導電繞組 206 可以是反繞的或者在交錯佈置中捲繞的，並且每一個導電繞組，例如第一導電繞組 204 和第二導電繞組 206，可以具有相等的匝數。優選地，根據 CSR 202 中增大的通量級 (見圖 2A)，在 SSFCL 200 中的 CSR 202 的磁芯 203 可以對應於具有可預測的磁特性的高磁導率材料。CSR 202 包含可以經配置以在穩態操作期間呈現最小阻抗並且在故障狀態期間呈現相對較大阻抗以有效限制故障電流的第一導電繞組 204 和第二導電繞組 206。

**【0014】** 圖 2B 圖示了包含電流分離電抗器 (CSR) 202 以及故障電流觸發 (FTC) 電路 210 的 SSFCL 200。在圖 2B 中，所使用的電流分離電抗器 (CSR) 202 不具有 VCR 208 (見圖 2A)。短暫地轉向圖 2B，CSR 202 包含圍繞磁芯 203 的第一導電繞組 204 和第二導電繞組 206。第二導電繞組 206 可以是反繞的或者在交錯佈置中捲繞的，並且繞組中的每一者，例如第一導電繞組 204 和第二導電繞組 206，可以具有相等的匝數。優選地，根據 CSR 202 中增大的通量級，在 SSFCL 200 中的 CSR 202 的磁芯 203 可以對應於具有可預測的磁特性的高磁導率材料。CSR 202 包含可以經配置以在穩態操作期間呈現最小阻抗並且在故障狀態期間呈現相對較大阻抗以有效限制故障電流的第一導電繞組 204 和第二導電繞組 206。因此，在一個實施例中，CSR 202 耦合到 FTC 210 上，並

且 FTC 210 經配置以在由系統電流輸入端接收的故障電流超出預定觸發電流時斷開。瞬態電壓控制電路可以耦合到 CSR 202 上。

【0015】 返回到圖 2A 和 2B，SSFCL 200 可以與約 250 安培或更高的系統電流  $I_T$  一起使用。例如，4,000 安培的電流可以由圖 2A 的具有可用的恰當大小的元件的電路來保護。FTC 210 包含瞬態過電壓控制電路（TOCC）以及開關，如下文結合圖 3A 到 3C 進一步描述。在故障狀態下，可以跨越 FTC 210 調節約 2000 伏或更高的壓降。

【0016】 CSR 202 可以用來管理高系統電流，使得更小比例的標準/穩態和故障電流流過固態故障電流觸發電路 210。與通過輸電線 106 供應的公用系統電流相比，大多數固態裝置（例如，IGCT、IGBT 以及二極體等）評估用於較低電流。由於更小部分的系統電流  $I_T$  流過 FTC 210，因此 CSR 202 使 SSFCL 200 能被設計為使用固態裝置。進入的系統電流  $I_T$  在流過第一導電繞組 204 的第一分量  $I_{w1}$  與流過第二導電繞組 206 的第二分量  $I_{w2}$  之間分離。電流  $I_{w2}$  進一步在流過 VCR 208 的電流  $I_{VCR}$  與流過 FTC 210 的電流  $I_{FTC}$  之間分離。

【0017】 在一個實施例中，第一導電繞組 204 可以與第二導電繞組 206 以反向並聯的關係電連接。進入 CSR 202 的電流被引導在第一方向上通過第一導電繞組 204 並且在相反的第二方向上通過第二導電繞組 206。在一個實施例中，流過第一導電繞組 204 的電流可以因此與流過第二導電繞組 206 的電流相等，並且由於第一

導電繞組 204 與第二導電繞組 206 在上述反向並聯的配置中佈置，因此導電繞組將磁性耦合並且將呈現可忽略的淨阻抗和/或同等的阻抗。例如，在雙繞無感線圈佈置中，第一導電繞組 204 與第二導電繞組 206 可以繞芯（例如，圖 2C 中示出的磁芯 203）捲繞。有其它繞組佈置可供使用並且可以取決於偏好和/或技術設定來應用。在此考慮芯可以是具有如所屬領域的一般技術人員將瞭解的特定應用的電流限制設定所指定的尺寸的鐵芯或空氣芯。

【0018】 通過使用具有合適匝數的第一導電繞組 204 和第二導電繞組 206，可以調整 SSFCL 200 的穩態操作以沿著並聯路徑  $I_{w1}$  和  $I_{w2}$  分配穩態電流，使得若  $x\%$  的穩態電流沿著路徑  $I_{w1}$  流動，則剩餘的  $(100-x)\%$  的穩態電流沿著路徑  $I_{w2}$  流動。可替代地，若  $x\%$  的穩態電流沿著路徑  $I_{w2}$  流動，則剩餘的  $(100-x)\%$  的穩態電流沿著路徑  $I_{w1}$  流動。因此，在穩態操作（例如，穩態條件）期間，CSR 202 的第一導電繞組 204 和第二導電繞組 206 可以設定成以預定的方式沿著並聯路徑  $I_{w1}$  和  $I_{w2}$  分配穩態電流。

【0019】 在一個實施例中，例如，第一導電繞組 204 和第二導電繞組 206 可以經選定具有合適匝數，用於在路徑  $I_{w1}$  與  $I_{w2}$  之間均勻分配 SSFCL 200 中的電流，使得電流可以經分配使  $50\%$  的電流沿著路徑  $I_{w2}$  流動並且  $50\%$  的電流沿著路徑  $I_{w1}$  流動。在其它實施例中，比率可以設定成  $40\%$  的電流沿著路徑  $I_{w2}$  流動並且  $60\%$  的電流沿著路徑  $I_{w1}$  流動； $30\%$  的電流沿著路徑  $I_{w2}$  流動並且  $70\%$  的電流沿著路徑  $I_{w1}$  流動。換句話說，沿著對應的路徑  $I_{w2}$  和  $I_{w1}$  的比

率可以設定成例如 40/60、30/70、20/80。在精確地設定電流分配的一些情況下，可以作為可選裝置實施外部調諧繞組（未示出）。

【0020】 在 SSFCL 200 的穩態操作期間，具有反繞的繞組（例如，第一導電繞組 204 和第二導電繞組 206）的 CSR 202 消除了電流分離電抗器的芯內部的磁場。更確切地說，電流分離裝置將穩態電流（例如，系統電流  $I_T$ ）分開到在相反方向上流過第一導電繞組 204 和第二導電繞組 206 的兩個支路（ $I_{W1}$  和  $I_{W2}$ ）中，從而產生在電路中引起可忽略的同等阻抗或淨阻抗的淨零或可忽略的磁場。因此，第一導電繞組 204 的電抗被第二導電繞組 206 的經相反地引導的電抗中和。因此，通過選擇具有合適匝數的第一導電繞組 204 和第二導電繞組 206，可以通過 CSR 路由預定部分的穩態電流。相對於常規 FCL 系統降低了在 SSFCL 200 上的穩態電流負載。因此，也可以降低 FCL 的成本和物理大小。

【0021】 出現故障狀態時，通過 SSFCL 200 的電流突然增大，此時增大的故障電流可以通過電流感測器（例如，圖 1 中示出的電流感測器 150）測量。換句話說，在短路故障狀態期間，故障電流超出標準穩態電流並且在第一導電繞組 204 以及繞組 206 二者中流動。

【0022】 在從電流感測器 150 接收到指示故障電流超出預定閾值電流電平的信號輸出時，存儲在其中的具有至少一個處理器裝置以及至少一個記憶體裝置的控制器 175（如圖 1 中所示）立即使 CSR 202 “跳閘(trip)”。換句話說，控制器 175 以及電流感測器

150 致使 SSFCL 200 進入故障狀態。具體來說，當第二導電繞組 206 中的電流超出預定觸發電流（例如，預定閾值電流）時，FTC 210 斷開並且故障電流轉移到 VCR 208 以及瞬態過電壓控制電路（TOCC）（在圖 3A 到 3D 中示出為 312、322、332 或 342）上。當 FTC 210 斷開時，VCR 208 以及 TOCC 312、322、332 或 342 的阻抗變得高到足以減少通過第二導電繞組 206 的電流，因此致使 CSR 202 失去其磁場消除，並且引入高電流限制 FTC 210，所述 FTC 可操作以在 FTC 210 接收到故障電流超出穿過故障電流限制器系統 1000 的預定閾值電流的信號（例如，從電流感測器檢測到）時產生斷路。當 FTC 210 斷開時，已經穿過 FTC 210 的電流  $I_{FTC}$  轉移到穿過 VCR 208 以及並聯的 TOCC 的  $I_{VCR}$  上。CSR 202 呈現同等的阻抗，所述阻抗大到足以將故障電流限制到負載 121、123 的可接受的峰到峰振幅。換句話說，斷開 FTC 210 會將 VCR 208 以及 TOCC 312、322、332 或 342 的高阻抗插入到電路中以減少通過第二導電繞組 206 的電流。（例如，高阻抗意指電路中不允許任何電流流動或不允許電流的一部分流動的點），其中 VCR 208 以及 TOCC 的阻抗比第二導電繞組 206 的阻抗高得多。在恢復期間，在故障清除之後，FTC 210 閉合並且建立具有低阻抗電路的標準操作條件。

【0023】可替代地，不具有 CSR 202 的故障電流限制電路將迫使故障電流限制器觸發並聯的固態開關。由於不均衡的分流以及相關的故障，因此此類並聯的觸發將變得非常具有挑戰性並且不太

可靠。根據本發明的實施例避免了具有並聯的有源故障電流觸發電路的電路設計。因此，SSFCL 200 是極低阻抗的裝置並且在穩態操作期間插入不到 1% 的系統阻抗。換句話說，SSFCL 具有不到 1% 的壓降。流過 VCR 208 的電流可忽略不計。例如，若 CSR 202 在第一導電繞組 204 與第二導電繞組 206 之間具有 3:1 的電流比，則通過第二導電繞組 206 的 FTC 支路將具有總電流的 25%。通過針對比率分別修改第一導電繞組 204 和第二導電繞組 206 中的匝數 N1 和 N2，可以易於實現其它比率。

【0024】圖 3A 到 3D 分別圖示可以包含為圖 2A 到 2B 中示出的 FTC 210 的一部分的 FCSS 的故障電流感測開關(FCSS)電路 310、320、330 和 340。FCSS 電路 310、320、330 和 340 可以包含各種類型的開關，例如機電開關、快速回應可變電阻器、保險絲、集成門極換向晶閘管 (IGCT)、絕緣柵雙極型電晶體 (IGBT)、真空管等等。每一個 FCSS 包含 TOCC 312、322、332 或 342，也稱為“緩衝”電路。緩衝電路是瞬態過電壓抑制電路。TOCC 電路 312、322、332 或 342 經設計以作為 FTC 210 的一部分通過執行一個或多個不同的緩衝功能來提供高效且可靠的操作。例如，作為如在切換反相器或在其輸出端處具有電感濾波電路的斬波電路中電流切斷的結果，緩衝電路抑制跨越開關所產生的電壓尖峰。具體來說，緩衝電路防止在斷開切換裝置時出現跨越切換裝置的過度的瞬態電壓峰值並且防止最終中斷流過輸出濾波器的電感元件的電流。TOCC 電路 312、322、332 或 342 防止了在瞬態電壓峰值超出

切換裝置的額定電壓限制時可能出現的對切換裝置的損壞。TOCC 電路 312、322、332 或 342 可以用來調整切換軌跡、減少切換損耗和/或控制電路中的寄生元件的影響。

【0025】 一般來說，圖 3A 中示出的 FCSS 電路 310 包含 IGCT 開關 314（也就是機電開關）以及以下並聯連接：(a) 串聯電阻（R）312a 和電容（C）312b；(b) 電阻（Rp）312c；以及 (c) 金屬氧化物壓敏電阻（MOV）312d。TOCC 電路 312 包含相對較高的電容值和電阻值，使得  $>100\ \mu\text{s}$ （即， $R \cdot C > 100\ \mu\text{s}$ ）的時間常量用於電流限制器應用。應注意，一些具有低觸發電流的應用可以使用（小於） $<100\ \mu\text{s}$ （微秒）的時間常量。例如，對於灌木叢火災 (Brush-fire protection) 保護，可以使用  $20\ \mu\text{s}$  的時間常量。一般來說，理想的時間常量是（大於） $>10\ \mu\text{s}$ 。

【0026】 大多數固態或電力電子開關，例如 IGBT（圖 3B 中示出），用於其中電路中存在低電感的應用。使用電源頻率的故障電流限制器通常在具有較高電感的電路中操作，並且當故障出現時  $L \times \partial i / \partial t$  的高乘積產生相對較高的瞬態過電壓。例如電力系統的發電、輸電以及配電等高電感電路使用瞬態過電壓控制電路，例如 TOCC 312、322、332 或 342，使用高電容值和高電阻值以抑制瞬態過電壓。

【0027】 圖 3B 中示出的 FCSS 電路 320 包含與 IGBT 開關 324 並聯的 TOCC 322，IGBT 開關 324 包含 IGBT1 和 IGBT2。類似於 TOCC 312，TOCC 322 包含以下並聯連接：(a) 串聯電阻（R）322a 和

電容 (C) 322b ; (b) 電阻 (Rp) 322c ; 以及 (c) 金屬氧化物壓敏電阻 (MOV) 322d。大多數固態或電力電子開關 (例如 IGBT1 和 IGBT2) 用於其中電路中存在低電感的應用。在電源頻率下使用的故障電流限制器通常在具有高電感的電路中操作，並且當故障出現時  $L \times di/dt$  的高乘積產生相對較高的瞬態過電壓。SSFCL 的高電感電路應用使用具有高電容值和高電阻值的示例性 TOCC 以抑制瞬態過電壓。

【0028】 圖 3C 圖示了包含與 IGCT 開關 314 並聯的 TOCC 332 的 FCSS 電路 330，IGCT 開關 314 具有 IGCT1 和 IGCT2。類似於 TOCC 312 和 322，TOCC 332 包含以下並聯連接：(a) 串聯電阻 (R) 332a 和電容 (C) 332b ; (b) 電阻 (Rp) 332c ; 以及 (c) 金屬氧化物壓敏電阻 (MOV) 332d。FCSS 電路 310、320、330 和 340 可以與其它類型的開關 (例如，真空管) 一起使用。

【0029】 圖 3D 圖示了包含與 IGBT 開關 324 並聯的 TOCC 342 的 FCSS 電路 340，IGBT 開關 324 包含 IGBT1 和 IGBT2。類似於 TOCC 312、322 和 332，TOCC 342 包含以下連接：(a) 串聯電阻 (R) 342a 和電容 (C) 342b ; 以及 (c) 金屬氧化物壓敏電阻 (MOV) 342d。IGBT 開關 324 可以是機電開關。圖 3D 圖示了每一個 IGBT 開關 314 (IGBT1 和 IGBT2) 或其它切換裝置可以具有電容器 343C 以及 TOCC 312、322、332 或 342。電容器 343C 以及 TOCC 312、322、332 或 342 可以是具有共用的或個別的金屬氧化物壓敏電阻 (MOV) 332d 的電阻器緩衝電路。

【0030】 圖 4 到 6 示出了可用于更高電壓應用的故障控制電路 113 的各種實施例。由於跨越 FTC 210 的壓降約為 2 KV，因此可以使用額外的 FTC 以便提供與更高電壓相容的故障電流限制器電路。

【0031】 具體來說，圖 4 中圖示的 SSFCL 200 包含 CSR 202（如圖 2A 中所示）以及串聯連接的多個 VCR 和 FTC 模組  $M1 \cdots M_n$ 。每一個模組  $M1 \cdots M_n$  包含與故障觸發電路（FTC）（示出為 210-1、210-2 和 210-n）並聯的電壓控制電抗器（VCR）208（示出為 208-1、208-2 和 208-n）。例如，SSFCL 模組  $M1$  包含並聯連接的 VCR 208（圖 4 中示出為 208-1）以及故障觸發電路 FTC 1（210-1）。SSFCL 模組  $M2$  包含並聯連接的電壓控制電抗器 VCR 2（208-2）以及故障觸發電路 FTC 2（210-2）。SSFCL 模組  $M_n$  包含並聯連接的電壓控制電抗器  $VCR_n$ （208-n）以及故障觸發電路  $FTC_n$ （210-n）。多個 SSFCL 模組  $M1 \cdots M_n$  串聯連接，並且與 CSR 202 的第二導電繞組 N2 串聯。圖 4 的 SSFCL 200 還在模組  $M1 \cdots M_n$  的個別 VCR 或 FTC 在作業期間出故障的情況下提供冗餘。

【0032】 圖 5 圖示了包含 VCR 208 的 SSFCL 200，所述 VCR 208 具有相對較大電感值、與多個故障觸發電路  $FTC1$ （210-1）、 $FTC2$ （210-2） $\cdots FTC_n$ （210-n）並聯連接，其中 FTC 210-1 $\cdots$ 210-n 中的每一者串聯連接並且如圖 5 中所示互連。在此實施例中，FTC 中的每一個界定模組  $M1 \cdots M_n$ 。例如，模組  $M1$  被定義為  $FTC1$ （210-1）。同樣，模組  $M2$  被定義為  $FTC2$ （210-2）並且模組  $M_n$  被定義為  $FTC_n$ （210-n）。在另一實施例中（未在圖 5 中圖示），

多個 VCR 可以串聯連接，並且每一個 VCR 可以與兩個或更多個 FTC 並聯連接。

【0033】圖 6 圖示了包含串聯連接的多個 SSFCL 模組 601-1...601-n 的故障電流限制電路的 SSFCL 200。圖 6 圖示了裝置級模組化，因此每一個模組 601-1...601-n 包含 CSR 602-1...602-n 以及與 FTC 610-1...610-n 並聯的 VCR 608-1...608-n。例如，模組 601-1 包括具有繞組 N11 和繞組 N21 的 CSR 602-1，以及與 FTC 610-1 並聯連接的 VCR 608-1。同樣，模組 601-2 包括具有繞組 N12 和繞組 N22 的 CSR 602-2，以及與 FTC 610-2 並聯連接的 VCR 608-2。模組 601-n 包括具有繞組 N1n 和繞組 N2n 的 CSR 602-n，以及與 FTC 610-n 並聯連接的 VCR 608-n。如與圖 4 和 5 中示出的 SSFCL 200 相比，圖 1 的 SSFCL 200 在具有 SSFCL 模組 601-1...601-n 的 SSFCL 200 之間提供更大的電壓隔離和獨立，從而提高整體電壓控制能力。若出現故障狀態，例如短路故障 125（例如，圖 1 中示出的 125），則 SSFCL 模組 601-1...601-n 的 FTC 將斷開，並且故障電流將降低至與穩態電流相等的量，或降低至預定的量，例如，降低 50%。

【0034】圖 7 圖示了具有使用 VCR 208 以及 FTC 210 處理的負載電流  $I_T$  的 SSFCL 電路的實施例 700，所述 SSFCL 電路不將與電流分離電抗器並聯的一個或多個 FTC 210 元件互連。實施例 700 可以與（例如）高達約 250 安培的電流  $I_T$  一起使用。

【0035】圖 8 圖示了具有使用 FTC 210 處理的負載電流  $I_T$  的

SSFCL 電路的實施例 800，所述 SSFCL 電路不與 VCR 208（見圖 2A）或 CSR 202（見圖 2A）互連。圖 8 中示出的配置可以結合 TOCC 312、322、332 或 342（也稱為“緩衝”電路，如圖 3A 到 3C 中所示）用於閃光電弧保護。實施例 800 可以在具有高達約 250 安培的電流  $I_T$  的應用中使用。

【0036】圖 9 圖示了在變壓器的中性點接地中使用以限制相對地 (phase-to-ground) 故障的具有電壓控制電抗器的 FCL 電路的方塊圖 900。根據本發明的實施例，本申請案適用於閃光電弧減少。圖 9 圖示了結合由 VCR 208 以及 SSFCL 200 組成的 FCL 電路在中性點接地（地面標記為“G” 925 並且中性點標記為“N”）中使用的變壓器 109（見圖 1）。此配置用以限制相對地 (phase-to-ground) 故障電流，例如短路故障 125，具有來自 SSFCL 200 的足夠低的電流  $I_{ss}$ （“ $I_{ss}$ ”是固態電流）並且不將 FTC（例如，FTC 210）與 CSR 202（見圖 2）互連。應注意，閃光電弧減少以及灌木叢火災保護是使用 SSFCL 200 的應用中的一些，並且本文中描述的所圖示的實施例可以用於任何故障電流限制。

【0037】圖 10 圖示了包含閃光電弧減少的用作用於相對地 (phase-to-ground) 故障的一般 FCL 電路的故障電流限制器系統 1000。具體來說，故障電流限制器系統 1000 包含 SSFCL 200 電路，SSFCL 200 電路在一側上連接到變壓器 109（見圖 1）的中性點接地（地面標記為“G” 925 並且中性點標記為“N”）上，並且在另一側上連接到地面 925 上。SSFCL 200 用以抑制相對地

(phase-to-ground)故障電流，例如短路故障 125，用於灌木叢火災保護，其中固態電流  $I_{ss}$  低到足以使用 SSFCL 200 處理。在需要將接地故障電流抑制到極低電流時（例如，在灌木叢火災保護應用中）使用配置在變壓器 109 的中性點接地中的 SSFCL 200。

【0038】 圖 11 圖示了用於固態故障電流限制器系統的操作方法的流程圖 1100。在穩態操作期間，在步驟 1110 處，具有第一導電繞組 204 和第二導電繞組 206（可以是反繞的繞組）的 CSR 202 接收輸入電流。第一導電繞組 204 和第二導電繞組 206 在電流分離電抗器 202 的芯內部具有磁場。在短路故障狀態期間，在步驟 1120 處，通過 CSR 202 檢測到故障電流。在步驟 1120 處，CSR 202 檢測到故障電流大於在第一導電繞組 204 以及第二導電繞組 206 二者中流動的標準電流（例如，穩態電流）。更確切地說，在步驟 1130 處，CSR 202 檢測到第二導電繞組 206 超出預定閾值/觸發電流。在步驟 1140 處，FTC 210 斷開，並且在步驟 1150 處故障電流轉移到 VCR 209 以及瞬態過電壓控制電路（TOCC）上。TOCC 可以與 CSR 202 或與 VCR 208 並聯連接（圖 3A 到 3C 中示出的實施例）。當 FTC 210 斷開時，在步驟 1160 處 VCR 208 以及 TOCC 的阻抗增加，以減少通過第二導電繞組 206 的電流，因此致使 CSR 202 失去其磁場消除，並且引入高電流限制電抗。在 CSR 中的磁場消除以及高電流限制電抗的引入限制了在故障狀態期間傳遞到負載上的電流的量。

【0039】 綜上所述，本發明的實施例提供一種使用機械保護裝置

提供故障保護的電流保護系統，機械保護裝置提供優於可能更複雜並且更昂貴的其它電子保護電路的益處。例如，本發明的固態故障電流限制器系統可以為電路斷路器提供減少的閃光電弧能，以及通過操作並處理較低的閃光電弧能獲得的對應安全益處。這可以用作永久性安裝的故障保護裝置或用作可攜式故障保護裝置。例如，作為可攜式裝置，它可以用作供在開關設備區域中工作的人員使用的安全裝置，在開關設備區域中使用此裝置會減少潛在電流。此外，固態故障電流限制器系統可以用於低電流應用以及高電流應用中。減少電弧能還可以減少因電氣短路故障引起的火災。本申請案對易遭受因電火引起的火災的電力設施有益。另外，使用電流分離電抗器使得能夠使用固態故障電流限制器用於解決由通過固態開關的高電流引起的問題，這提供了優於可能更複雜並且更昂貴的其它電子保護電路的益處。

【0040】 因此，如本文所述，各種實施例提供一種固態故障電流限制器系統。固態故障電流限制器包含電流分離電抗器，所述電流分離電抗器包括系統電流輸入端、無源電流輸出端以及控制電流輸出端；電壓控制電抗器，所述電壓控制電抗器包括第一端部以及第二端部，第一端部耦合到控制電流輸出端上並且第二端部耦合到無源電流輸出端上；以及故障觸發電路，所述故障觸發電路與電壓控制電抗器並聯耦合。故障電流觸發電路經配置以在由系統電流輸入端接收的故障電流超出預定觸發電流時斷開。固態故障電流限制器還包含瞬態電壓控制電路，所述瞬態電壓控制電

路經配置與電壓控制電抗器並聯耦合以接收故障電流。

【0041】 電流分離電抗器進一步包括第一電路以及第二電路，第一電路以及第二電路在穩態操作條件期間磁性耦合並且在故障狀態期間磁性解耦以限制傳遞到負載上的電流的量，並且經配置以使電流的有限部分以及故障電流流過故障觸發電路。第一電路包括繞芯捲繞的第一導電繞組並且第二電路包括繞芯捲繞的第二導電繞組，第二導電繞組可以相對於第一導電繞組反繞。第一導電繞組經配置以承載在第一方向上的電流（例如，標準工作電流），並且第二導電繞組經配置以承載在與第一方向相反的第二方向上的電流，以使在固態故障電流限制器系統的穩態操作期間由第一導電繞組引起的第一磁場與第二導電繞組的第二磁場耦合。電流分離電抗器經配置以在故障狀態期間承載通過第一導電繞組以及第二導電繞組二者的故障電流。電流分離電抗器經配置以響應於故障觸發電路斷開將故障電流傳遞到電壓控制電抗器以及瞬態過電壓控制電路上。

【0042】 電壓控制電抗器以及瞬態過電壓控制電路經配置以響應於故障觸發電路斷開增大阻抗，並且電流分離電抗器經配置以回應於阻抗的增大提供電流限制電抗。瞬態電壓控制電路進一步包括串聯電阻和電容（RC）電路以及電阻的並聯連接。

【0043】 鑒於 SSFCL 200 的上述配置，通過 CSR 202 處理的電流，即在 SSFCL 200 中相當大部分的穩態電流，SSFCL 200 可以經設定大小以處理少得多的穩態電流。因此可以降低材料和勞動成

本。還可以降低 FCL 的物理大小，從而實現在並非不切實際的情況下將 FCL 安裝在原本可能難以安裝的位置中。此外，由於更少的有源 SSFCL 200 組件還可以降低電磁力及其影響。還可以降低在 SSFCL 200 中耗散的能量。

【0044】 儘管已經參考某些實施例公開了本發明的標的物，但是在不脫離如所附權利要求書中所定義的全部標的物的情況下對所描述的實施例的多種修改、更改以及變化是可能的。因此，希望本發明的標的物不限於所描述的實施例，而是具有通過權利要求書以及其等效物的語言所界定的全部範圍。

【0045】 儘管本文中已經描述了本發明的某些實施例，但是並不意圖將本發明限於這些實施例，因為希望本發明具有如本領域將允許的廣泛的範圍並且對說明書的理解也是如此。因此，上文的描述不應解釋為限制性的，而僅僅是作為具體實施例的例證。所屬領域的技術人員將在本文所附的權利要求書的範圍和精神內設想其它修改。

## 【符號說明】

### 【0046】

101：電源

103：介面電路

105：電路斷路器

106：輸電線

- 107：具有變電站的介面
- 109：變壓器
- 111：電路斷路器
- 115：電路斷路器
- 117、119：匹配電路
- 121、123：負載
- 125：短路故障
- 150：電流感測器
- 175：控制器
- 200：SSFCL
- 202：電流分離電抗器
- 203：磁芯
- 204：第一導電繞組
- 206：第二導電繞組
- 208、208-1、208-2、208-n：電壓控制電抗器
- 210、210-1、210-2、210-n：故障電流觸發
- 310、320、330、340：故障電流感測開關電路
- 312、322、332、342：瞬態過電壓控制電路
- 312a、322a、332a、342a：串聯電阻
- 312b、322b、332b、342b：電容
- 312c、322c、332c、342c：電阻
- 312d、322d、332d、342d：金屬氧化物壓敏電阻

314：IGCT 開關

324：IGBT 開關

601-1~601-n：SSFCL 模組

602-1~602-n：CSR

610-1~610-n：FTC

608-1~608-n：VCR

700：實施例

800：實施例

900：方塊圖

925：地面

1000：故障電流限制器系統

1100：流程圖

1110~1160：步驟

N1、N2：匝數

$I_{W1}$ ：第一分量

$I_{W2}$ ：第二分量

$I_{FTC}$ ：電流

$I_{VCR}$ ：電流

$I_T$ ：系統電流

## 【發明申請專利範圍】

【第1項】 一種固態故障電流限制器，包括：

電壓控制電抗器，所述電壓控制電抗器包括第一端部以及第二端部；

故障觸發電路，所述故障觸發電路與所述電壓控制電抗器並聯耦合，其中所述故障觸發電路經配置以在由系統電流輸入端接收的故障電流超出預定觸發電流時斷開；

電流分離電抗器；以及

瞬態電壓控制電路，所述瞬態電壓控制電路經配置與所述電壓控制電抗器並聯耦合以接收所述故障電流，

其中當所述故障觸發電路斷開時，所述電壓控制電抗器以及所述瞬態電壓控制電路的阻抗增加，致使所述電流分離電抗器磁場消除以及引入高電流限制電抗，限制了在故障狀態期間傳遞到負載上的電流的量。

【第2項】 如申請專利範圍第1項所述的固態故障電流限制器，

其中所述電流分離電抗器進一步包括第一電路以及第二電路，所述第一電路以及所述第二電路在穩態操作條件期間磁性耦合並且在所述故障狀態期間磁性解耦以限制傳遞到負載上的電流的量，並且經配置以使穩態電流的一部分以及所述故障電流流過所述故障觸發電路。

【第3項】 如申請專利範圍第2項所述的固態故障電流限制器，其中所述第一電路包括繞芯捲繞的第一導電繞組並且所述第二電路

包括繞所述芯捲繞的第二導電繞組，所述第二導電繞組相對於所述第一導電繞組反繞。

【第4項】 如申請專利範圍第3項所述的固態故障電流限制器，其中所述第一導電繞組經配置以承載在第一方向上的電流並且所述第二導電繞組經配置以承載在與所述第一方向相反的第二方向上的電流，以使在所述穩態操作條件期間由所述第一導電繞組引起的第一磁場與所述第二導電繞組的第二磁場耦合。

【第5項】 如申請專利範圍第4項所述的固態故障電流限制器，其中所述電流分離電抗器經配置以在所述故障狀態期間承載通過所述第一導電繞組以及所述第二導電繞組二者的所述故障電流。

【第6項】 如申請專利範圍第5項所述的固態故障電流限制器，其中所述電流分離電抗器經配置以響應於所述故障觸發電路斷開將所述故障電流傳遞到所述電壓控制電抗器以及所述瞬態電壓控制電路上。

【第7項】 如申請專利範圍第6項所述的固態故障電流限制器，其中所述電壓控制電抗器以及所述瞬態電壓控制電路經配置以響應於所述故障觸發電路斷開而增大阻抗，並且所述電流分離電抗器經配置以回應於阻抗的所述增大提供電流限制電抗。

【第8項】 如申請專利範圍第7項所述的固態故障電流限制器，其中所述瞬態電壓控制電路進一步包括開關，所述開關與串聯電阻和電容電路並聯連接，所述串聯電阻和電容電路包含彼此串聯的電阻器以及電容器，且與電阻並聯連接。

【第9項】 一種固態故障電流限制器系統，包括：

電壓控制電抗器；

電流感測器；以及

固態故障觸發電路，所述固態故障觸發電路與所述電壓控制電抗器並聯耦合，其中所述固態故障觸發電路經配置以在所述固態故障觸發電路從所述電流感測器接收到故障電流超出穿過所述固態故障電流限制系統的預定閾值電流的信號時斷開，並且所述電壓控制電抗器以及所述瞬態電壓控制電路經配置以在所述固態故障觸發電路斷開時接收所述故障電流，其中所述固態故障觸發電路包括：

瞬態電壓控制電路，所述瞬態電壓控制電路與所述電壓控制電抗器並聯耦合；以及

開關，與所述瞬態電壓控制電路並聯耦合。

【第10項】 如申請專利範圍第9項所述的固態故障電流限制器系統，更包括電流分離裝置，所述電流分離裝置包括繞芯捲繞的第一導電繞組和第二導電繞組，

其中所述第一導電繞組和所述第二導電繞組在穩態操作條件期間磁性耦合並且經配置以使穩態電流的一部分以及所述故障電流流過所述故障觸發電路。

【第11項】 如申請專利範圍第10項所述的固態故障電流限制器系統，其中所述第一導電繞組經配置以承載在第一方向上的電流並且所述第二導電繞組經配置以承載在與所述第一方向相反的第二方向上的電流，以使在所述固態故障電流限制器系統的穩態操作

期間由所述第一導電繞組引起的第一磁場與所述第二導電繞組的第二磁場耦合。

【第12項】 如申請專利範圍第9項所述的固態故障電流限制器系統，其中響應於所述固態故障觸發電路被斷開，所述電壓控制電抗器以及所述瞬態電壓控制電路經配置以增大阻抗。

【第13項】 如申請專利範圍第10項所述的固態故障電流限制器系統，其中所述電流分離裝置的所述第一導電繞組和所述第二導電繞組經配置在所述故障狀態期間磁性解耦以限制傳遞到負載上的電流的量。

【第14項】 如申請專利範圍第13項所述的固態故障電流限制器系統，其中所述電流分離裝置的所述第一導電繞組和所述第二導電繞組經配置以在所述故障狀態期間增大所述電流分離裝置的同等阻抗以限制傳遞到所述負載上的電流的所述量。