

## 應用螢火蟲演算法於地下電纜被覆損失之改善 Application of Firefly Algorithm for Sheath Losses Reduction of Underground Cables

黃世杰  
Shyh-Jier Huang

楊叔軒  
Shu-Hsuan Yang

\*蘇偉府  
Wei-Fu Su

劉憲宗  
Xian-Zong Liu

林鵬遠  
Peng-Yuan Lin

國立成功大學 電機工程學系  
台灣 台南市  
Department of Electrical Engineering  
National Cheng Kung University  
Tainan, Taiwan

\*崑山科技大學 電機工程學系  
台灣 台南縣  
Department of Electrical Engineering  
Kun Shan University  
Tainan, Taiwan

### 摘要

目前地下電纜系統多採交錯接地方式，當電纜區間皆等長時，被覆循環電流之產生量有限，惟於實際鋪設實務上並無法完全等長，故其所造成之損失即需審慎考量。因此本文之研究主旨即在於提出應用螢火蟲演算法，以協助地下電纜系統之補償電感安置，期以改善因長度或排列方式不同所造成電纜被覆損失過大之問題。至為驗證本文所提方法之應用價值，文中利用兩條線路系統進行測試，其測試結果應有助於佐證螢火蟲演算法於地下電纜被覆循環電流改善應用之研發可行性。  
關鍵字：地下電纜、被覆循環電流、螢火蟲演算法。

### Abstract

The cross-bonding is often adopted for underground cable grounding. When the section length is mutually equal, there exists only a limited amount of sheath circulating current; yet considering such section length in real-world underground cables constructions seldom reaches even, sheath loss reduction hence becomes an issue to further investigate. In this paper, a firefly algorithm is applied to determine the quantity of reactor, by which the sheath loss is expected to be improved. To confirm the practical value of this proposed approach, it was tested through two transmission lines. From the results gained from tests, they support the feasibility of the proposed method for the study considered.

Keywords: underground cable, sheath circulating current, firefly algorithm.

### I. 前言

近年來，隨著電力技術改良及都市發展之進步，輸電線路地下化已日漸趨多[1]，採用地下電纜供電系統可大幅降低外在環境影響，如雷擊、鹽霧害、颱風及外力碰觸等，因此可具有較高之供電可靠度。不過肇因於地下電纜對地充電電容較大，卻亦衍生不少問題，包括接地故障轉移、諧波共振、開關突波及保護協調等均是，此外電纜被覆感應電壓過高所造成之電纜及設備絕緣傷害及屏蔽導體產生之循環電流損失，亦均可能減少電纜運轉壽命。

目前地下電纜被覆常用的接地方式概分三種[2]：當二端採直接接地時，被覆循環電流較大，會造成較高線路損失；但若採行單端接地，則距接地點較遠處會有較高被覆感應電壓，危及人體安全，目前國內容許之安全感應電壓係限制在 65V 以下[3]；另若採以交錯接地，於各區間長度及排列方式完全相同時，有助於解決被覆感

應電壓及循環電流問題，故目前地下電纜大多採用交錯接地方式。然在實際電纜鋪設時，並無法確保各區間長度完全相同，其排列方式也會改變，均易造成感應電壓的不平衡，進而致使遮蔽銅線形成封閉環路而產生循環電流，不僅會增加電纜之被覆損失，並易造成電纜異常發熱及加快電纜老化。

有鑑於此，目前已有多篇文獻提出降低被覆損失的方法，包括電纜被覆處改採較高電阻率的材質[4]、使用新型隔離接地方式[5]或是降低電纜操作頻率[6]，惟其成本較高，並不適合已經建構好之地下電纜系統。另有文獻係提出藉由補償電纜來降低被覆循環電流[7]，亦即利用調增電纜長度使電纜區間等長，惜所增加之電纜長度不僅增加成本預算，冗置之電纜也會受到鋪設空間限制。續有文獻建議在電纜接續區換位時，予以串接補償電感器[8-10]，而由於補償電感造價便宜，且不受空間地形限制，可視為抑制被覆循環電流及降低被覆損失之可行方法，惟其主要缺點在於易使被覆感應電壓上升。

綜由上述討論，本文所採取的方法是將補償電感連接於電纜換位的被覆層上，以補償電纜因排列方式改變或各區段長度不同所造成的感應電壓不平衡，進而可降低被覆循環電流。在本文研究中，首先透過理論分析及數學模型建立，再利用新穎演算法求取最佳的補償電感值，不僅有效降低輸電能量損耗，避免電纜過熱，並有助於延長電纜使用壽命。而本文於研究探討中，並同時應用螢火蟲演算法來求取最佳的三相補償電感，亦即利用螢火蟲趨光特性，並考慮螢火蟲吸引常數、空氣吸收係數及位移之隨機常數，達成演算法之建模，進而將其應用於最佳化問題之求解。換言之，在本文之螢火蟲演算法中，首先將待解問題的控制變數視為每隻螢火蟲的位置，而每隻螢火蟲的亮度則等同於目標函數之適應值，亦即亮度最大的螢火蟲可視為內含最佳解之處。又此處必須說明的是在演算法中，各螢火蟲之移動判定是根據螢火蟲間的相對亮度，而此相對亮度卻與距離平方成反比，各螢火蟲均將往相對亮度較高的螢火蟲移動，故在問題尋優過程中，這些因素均需審慎考量。

茲為驗證螢火蟲演算法之可行性，本文目前係利用兩條地下電纜線路進行模擬測試，並設定不同參數來執行測試比較，期以驗證求得的補償電感確可有效降低地下電纜被覆循環電流及降低被覆損失。

## II. 問題描述

在實際地下電纜系統中，單心電纜之金屬被覆因受交變電流之電磁效應，所感應之電動勢即稱為被覆感應電壓，且此電壓大小與導體負載電流、電纜長度及電纜排列方式有關。又因過高之被覆感應電壓恐將危及人體安全，故目前國內容許之安全感應電壓係限制在 65V 以下。此外，由於電纜被覆之多點接地形成短路，將產生被覆循環電流，造成被覆回路損失，因此目前大部分電纜線路多採交錯接地方式，即如圖 1 所示，圖中 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>、M<sub>3</sub>、M<sub>4</sub> 代表人孔編號，l<sub>1</sub>、l<sub>2</sub> 及 l<sub>3</sub> 代表各段區間長度，D<sub>RS</sub>、D<sub>ST</sub>、D<sub>RT</sub> 分別為三相電纜間距。在此交錯接地系統中，第一個人孔使用普通接續匣，以將三相被覆連接後，施行直接接地；而第二個人孔與第三個人孔則使用絕緣接續匣(Insulation Joint)，以便於被覆之三相順序换位，俾以有效降低被覆感應電壓，即如圖 2 所示。

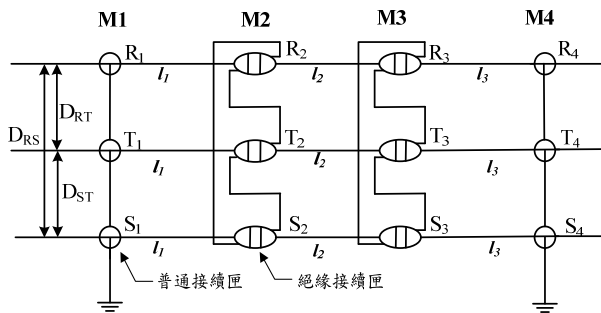


圖 1 電纜交錯接地示意圖

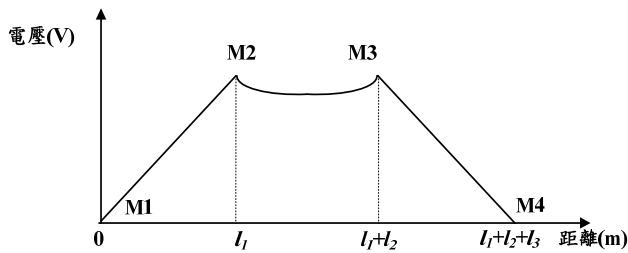


圖 2 交錯接地被覆感應電壓分布圖

### 2.1. 交錯接地計算模型建立

茲由圖 1 的單回線交錯接地系統及假設三相負載電流平衡，則各相負載電流  $I_R$ 、 $I_S$  及  $I_T$  可列如下式所示：

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \angle 0^\circ \\ I \angle -120^\circ \\ I \angle 120^\circ \end{bmatrix} \quad (1)$$

由於三相電纜的間距分別表示為  $D_{RS}$ 、 $D_{ST}$ 、 $D_{RT}$ ，則電纜被覆感抗之計算如下：

$$\begin{bmatrix} X_R \\ X_S \\ X_T \end{bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} \lambda_R / I_R \\ \lambda_S / I_S \\ \lambda_T / I_T \end{bmatrix} = 2\omega \times 10^{-4} \begin{bmatrix} \ln \frac{\sqrt{D_{RS} D_{RT}}}{r_s} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{D_{RS}}{D_{RT}} \\ \ln \frac{\sqrt{D_{RS} D_{ST}}}{r_s} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{D_{ST}}{D_{RS}} \\ \ln \frac{\sqrt{D_{RT} D_{ST}}}{r_s} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{D_{RT}}{D_{ST}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $X_R$ 、 $X_S$ 、 $X_T$  代表三相被覆感抗； $\lambda_R$ 、 $\lambda_S$ 、 $\lambda_T$  代

表三相磁通鏈； $\omega$  代表角頻率； $r_s$  代表電纜被覆之平均半徑。一般單回線電纜常用排列方式包括正三角排列、直角排列及三相並列，表 1 列出各方式對應的被覆感抗。

表 1 電纜單位長度被覆感抗

排列方式	感抗 ( $\Omega/\text{km}$ )	
正三角排列	$\begin{bmatrix} X_R \\ X_S \\ X_T \end{bmatrix} = 2\omega \times 10^{-4}$	$\begin{bmatrix} \ln(D/r_s) \\ \ln(D/r_s) \\ \ln(D/r_s) \end{bmatrix}$
直角排列	$\begin{bmatrix} X_R \\ X_S \\ X_T \end{bmatrix} = 2\omega \times 10^{-4}$	$\begin{bmatrix} \ln(D/r_s) + 0.173 - j0.3 \\ \ln(D/r_s) \\ \ln(D/r_s) + 0.173 + j0.3 \end{bmatrix}$
三相並列	$\begin{bmatrix} X_R \\ X_S \\ X_T \end{bmatrix} = 2\omega \times 10^{-4}$	$\begin{bmatrix} \ln(D/r_s) + 0.347 - j0.6 \\ \ln(D/r_s) \\ \ln(D/r_s) + 0.347 + j0.6 \end{bmatrix}$

由圖 1 可看出，經由被覆的换位後，R 相之終端感應電壓分別由  $R_1R_2$ 、 $T_2T_3$ 、 $S_3S_4$  等三區段的負載電流感應形成；S 相之終端感應電壓分別由  $S_1S_2$ 、 $R_2R_3$ 、 $T_3T_4$  等三區段的負載電流感應而成；T 相之終端感應電壓分別由  $T_1T_2$ 、 $S_2S_3$ 、 $R_3R_4$  等三區段的負載電流感應而成。因此  $R_1S_4$ 、 $S_1T_4$  及  $T_1R_4$  間之終端被覆感應電壓可由下式求得：

$$\begin{bmatrix} E_{R_1S_4} \\ E_{S_1T_4} \\ E_{T_1R_4} \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} l_1 X_{R_1} & l_3 X_{S_3} & l_2 X_{T_2} \\ l_2 X_{R_2} & l_1 X_{S_1} & l_3 X_{T_3} \\ l_3 X_{R_3} & l_2 X_{S_2} & l_1 X_{T_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中  $E_{R_1S_4}$ 、 $E_{S_1T_4}$ 、 $E_{T_1R_4}$  為終端被覆感應電壓； $X_{R_1}$ 、 $X_{R_2}$ 、 $X_{R_3}$ 、 $X_{S_1}$ 、 $X_{S_2}$ 、 $X_{S_3}$ 、 $X_{T_1}$ 、 $X_{T_2}$  及  $X_{T_3}$  分別表示各相電纜之被覆感抗。又因交錯接地的被覆循環電流可由導體與遮蔽銅線間相互阻抗、終端被覆感應電壓、導體電流及導體長度求得，而其中 R 相之被覆循環電流  $I_{sr}$  係依序流經  $R_1T_2S_3S_4$  等區間，故欲計算被覆循環電流時，需先由 (2) 式求得被覆感抗值，再由 (3) 式求得各區間之終端被覆感應電壓，進而推導三相被覆循環電流計算如下：

$$\begin{bmatrix} I_{sr} \\ I_{ss} \\ I_{st} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{R_1S_4} / X_{R_1S_4} \\ E_{S_1T_4} / X_{S_1T_4} \\ E_{T_1R_4} / X_{T_1R_4} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{cases} X_{R_1S_4} = (l_1 + l_2 + l_3)R_s + j(l_1X_{R_1} + l_2X_{T_2} + l_3X_{S_3}) \\ X_{S_1T_4} = (l_1 + l_2 + l_3)R_s + j(l_1X_{S_1} + l_2X_{R_2} + l_3X_{T_3}) \\ X_{T_1R_4} = (l_1 + l_2 + l_3)R_s + j(l_1X_{T_1} + l_2X_{S_2} + l_3X_{R_3}) \end{cases} \quad (5)$$

其中  $I_{sr}$ 、 $I_{ss}$  及  $I_{st}$  代表電纜三相被覆循環電流； $X_{R_1S_4}$ 、 $X_{S_1T_4}$  及  $X_{T_1R_4}$  代表電纜三相被覆的阻抗； $R_s$  代表電纜被覆本身之電阻。而由於本文研究目標乃在於改善被覆循環電流值，進而降低電纜三相被覆回路總損失  $P_{loss}$ ：

$$P_{loss} = (l_1 + l_2 + l_3)R_s \times (I_{sr}^2 + I_{ss}^2 + I_{st}^2) \quad (6)$$

因此如何降低此電力損耗量，即首先列為本文目標函數之一。

## 2.2. 交錯接地感應電壓及循環電流不平衡問題

此外，由於電纜之被覆感應電壓係與電纜長度成正比，因此在電纜理想鋪設條件下，各相的感應電壓和皆為零向量，即如圖 3(a)所示，但由於電纜的區間長度及排列方式會受到地形或其他因素影響，鮮少情形可達成區段長度  $l_1$ 、 $l_2$  及  $l_3$  完全等長，因此被覆感抗  $X_R$ 、 $X_S$ 、 $X_T$  也會改變，如將上述情形代入(3)式，並繪製其相量圖，即如圖 3(b)所示，此時虛線部分即因區間長度及排列方式不一致，造成感應電壓不平衡情形發生。今如將此不平衡感應電壓代入(4)式，則可計算獲得不平衡循環電流，且區段長度越不一致或是三區段被覆感抗差距越大，則所造成之循環電流及被覆損失越為顯著。

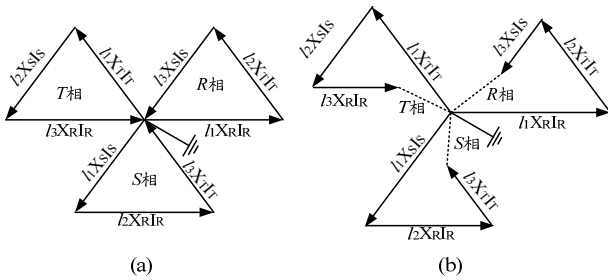


圖 3 (a)理想感應電壓向量圖(b)電纜不等長感應電壓向量圖

## 2.3. 補償方法

本文所使用的改善方法乃參考文獻所述，於電纜換位的被覆層處，適當串接補償電感以有效降低被覆循環電流及被覆損失[8-10]。圖 4 即為串接補償電感於交錯接地系統的示意圖，圖中的  $L_R$ 、 $L_S$ 、 $L_T$  分別為三相被覆所需之補償電感，此補償電感可改善被覆循環電流，進而有助於將被覆損失降至最低。但串接補償電感的缺點乃在於易使感應電壓提升，故需審慎評估補償電感的大小。下述(7)式乃用於評估各相被覆於連接補償電感前後的感應電壓變化量，而本文研究目標之一乃在於不增加太多感應電壓情況下，期使被覆損失降低量能更為顯著：

$$\Delta E = (E_R' - E_R) + (E_S' - E_S) + (E_T' - E_T) \quad (7)$$

上式中  $E_R$ 、 $E_S$ 、 $E_T$  為未接補償電感時之三相感應電壓； $E_R'$ 、 $E_S'$ 、 $E_T'$  為連接補償電感後的三相感應電壓。於是綜合上述，本文將損失減少量之最大化及感應電壓變化量之最少化予以整合，可推導目標函數如下：

$$\min G(\Delta P, \Delta E) = \min\left(\exp\left(\frac{-\Delta P_{loss}}{P_{loss,max}} + \frac{\Delta E}{E_{limit}}\right)\right) \quad (8)$$

其中  $\Delta P_{loss}$  為電力損失改善前後差值之絕對值， $P_{loss}$  為連接補償電感前後之被覆總損失； $\Delta E$  為三相被覆感應電壓上升量； $E_{limit}$  為電力公司對感應電壓規定之上限值。本文之研究主旨即在於研發應用螢火蟲演算法，以達成上述目標函數的最小化尋優，此演算法之特點及其模型建立，即於下節詳細討論之。

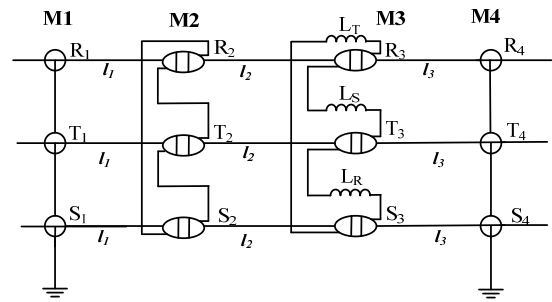


圖 4 電纜被覆補償電感連接示意圖

## III. 螢火蟲演算法

### 3.1 螢火蟲習性之簡介

於自然界中，螢火蟲是一種群居性高且具趨光性的物種，它通常出現在熱帶高溫的潮濕地區，利用規律性發光來吸引同伴。螢火蟲約有 2000 多種，每個特定物種螢火蟲各有獨特的閃爍模式。螢火蟲發光的功能包括以下三種：第一種功能為求偶；第二種為吸引獵物；第三種為發出保護預警機制。雄螢火蟲會發出特定閃爍速度和時間量的光來吸引雌螢火蟲，而同一種類的雌螢火蟲也會以同樣的發光模式回應。

本文之演算法是應用螢火蟲發光求偶的特性，其中發光的強度與距離平方成反比，此外空氣也會吸收光，使光的強度會隨距離增加而變弱。結合此兩個因素，使螢火蟲之發光可見度被侷限在有限距離內，通常彼此間在夜晚之溝通距離約為幾百公尺。在螢火蟲群中，螢火蟲會往較亮的螢火蟲飛行，經過多次的移動，即會聚集到最亮的螢火蟲周圍，而此時最亮的螢火蟲即為問題的最佳解。

### 3.2 螢火蟲演算法模型的建立

為應用螢火蟲演算法於問題求解，首需建立螢火蟲飛行的數學模型[11-12]。本文所使用的螢火蟲演算法 (Firefly Algorithm; FA)，是以螢火蟲的趨光特性為原則，並假設滿足以下三個理想化規則：(1)所有螢火蟲是不分性別的，即假設每隻螢火蟲均受其他螢火蟲吸引。(2)任兩隻螢火蟲的吸引力會正比於亮度，並與距離成反比，即於任何兩個閃爍的螢火蟲中，較不亮的螢火蟲會朝較亮的螢火蟲移動，而最亮的螢火蟲則是隨機移動。(3)螢火蟲的亮度與目標函數相關，當目標函數求取最大值時，亮度與目標函數成正比；當目標函數求取最小值時，則可透過適應函數的轉換，使其與亮度成比例關係，據以引導至期望值之範圍內。

如圖 5 所示為螢火蟲趨光特性示意圖。首先，一群初始產生的螢火蟲對應至不同的亮度，而亮度低的螢火蟲會往亮度較高的螢火蟲方向飛行，最具優勢的螢火蟲之亮度最高。惟螢火蟲看到對方的亮度會隨距離增加而降低，因此在判別比較亮度時，係採用相對亮度評估。



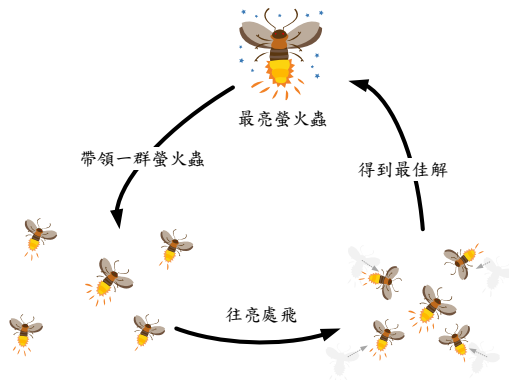


圖 5 螢火蟲趨光特性示意圖

在螢火蟲演算法中，計算相對亮度時需考慮以下兩個因素，亦即螢火蟲的光強度及螢火蟲間的距離，即以螢火蟲  $X_i$  與螢火蟲  $X_j$  為例，兩者間的距離  $r_{ij}$  可由(9)式求得，而螢火蟲  $X_i$  觀視螢火蟲  $X_j$  的相對亮度  $I_{ij}$  可由(10)式求得。

$$r_{ij} = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (9)$$

$$I_{ij} = I_j \times e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (10)$$

在上式中， $x_{i,k}$  代表第  $i$  個螢火蟲的第  $k$  個控制變數坐標； $I_j$  為螢火蟲  $X_j$  亮度； $\gamma$  為空氣對光的吸收係數。為使演算法之計算更有效率，可將(10)式的指數部分用泰勒級數展開，即如(11)式所示，當螢火蟲距離趨近於零時，以(11)式與(12)式近似求取相對亮度，即如(13)式所示。

$$e^{-\gamma r^2} \approx 1 - \gamma r^2 + \frac{1}{2} \gamma r^4 + \dots, \quad (11)$$

$$\frac{1}{1 + \gamma r^2} \approx 1 - \gamma r^2 + \gamma r^4 + \dots, \quad (12)$$

$$I_{ij} = \frac{I_j}{1 + \gamma \times r_{ij}^2} \quad (13)$$

當螢火蟲遇到比自己更亮的螢火蟲時，受到的吸引力會因亮度及距離改變，因此在螢火蟲演算法中，吸引力會受到螢火蟲發光強度、螢火蟲間的距離及空氣對光的吸收係數影響。今假設空氣對光的吸收係數固定為  $\gamma$ ，則螢火蟲間的吸引函數如下：

$$\beta(r) = \beta_0 \times e^{-\gamma r^2} \quad (14)$$

其中  $\beta_0$  為在螢火蟲彼此距離  $r=0$  時的吸引常數、 $r_{ij}$  為兩隻螢火蟲間的距離。此時需說明的是相對亮度及吸引函數都會受到空氣對光的吸收係數影響，當距離趨近於零時，相對亮度可視為另一隻螢火蟲的亮度  $I_{ij} \approx I_j$ ，吸引函數亦可視為常數  $\beta(r) = \beta_0$ ，此時發光強度不會與距離平方成反比，但當距離趨近於無限大時，相對亮度可視為零， $I_{ij} \approx 0$ ，此時吸引函數可視為單位脈衝函數  $\beta(r) \rightarrow \delta(r)$ ，意謂著所有螢火蟲間吸引力幾乎為零，亦代表螢火蟲靠發光溝通的距離趨近於零，此即類似模擬螢火蟲處於多霧的地區，此時其僅能隨機移動飛行。由

此可知，空氣對光的吸收係數對螢火蟲間的相對亮度及吸引函數影響甚大，因此需審慎評估吸收係數的大小。

又在螢火蟲演算法中，螢火蟲之飛行方式會受到螢火蟲本身的位置及較亮的螢火蟲位置改變。以螢火蟲  $X_i$  飛往相對亮度較大的螢火蟲  $X_j$  為例，其飛行方式如下所示：

$$X_{i+1} = X_i + \beta(r) \times (X_j - X_i) + \alpha \left( \text{rand} - \frac{1}{2} \right) \quad (15)$$

其中  $\alpha$  為螢火蟲隨機飛行係數， $\alpha \in [0,1]$ ； $\text{rand}$  是介於 0 到 1 的任意數。經由上式之推導，可協助掌握螢火蟲之飛行方式，進而與(10)式結合，可推得其亮度，再擇定亮度最高者，即等效於目標函數之尋得，而可用於求解電力工程問題。而因該演算法已同時融入隨機移動之觀念，故有助於降低求解過程中陷入局部解的機率，可予以正面肯定其所展現之尋優效能。

#### IV. 螢火蟲演算法計算流程

為應用螢火蟲演算法來求得降低被覆損失之最佳補償電感，以下說明應用此方法於補償電感的求解流程，如圖 6 所示，各流程步驟說明如下：

##### 步驟一：資料輸入及參數設定

在應用此方法前，需先將電纜相關資料予以輸入，以便後續計算之需，同時需設定螢火蟲演算法的相關參數，包括螢火蟲的總數量  $W$ 、螢火蟲間吸引常數  $\beta_0$ 、空氣對光的吸收係數  $\gamma$ 、螢火蟲隨機飛行係數  $\alpha$ 、最大演化次數  $MR$  及最大族群演化重複次數  $ME$ 。

##### 步驟二：隨機產生初始螢火蟲

在本最佳化問題中，首先隨機產生  $W$  隻螢火蟲組成的群體，每隻螢火蟲的位置代表問題中的控制變數，即電纜三相分別所需補償的電感值。

##### 步驟三：限制條件之滿足

由於電力公司規定感應電壓不能大於 65V，因此在求取最佳化問題前，需先確認最大感應電壓是否小於規定值，如果超過，則需重新執行初始化步驟。

##### 步驟四：比較螢火蟲群並選出最亮的螢火蟲

將  $W$  隻螢火蟲代入目標函數中計算目標函數值，再透過適應函數轉換並對應到每隻螢火蟲的亮度，接著選出最亮的螢火蟲為優勢螢火蟲  $GBest$  及其適應函數值為  $GBFit$ 。

##### 步驟五：比較、移動

每隻螢火蟲皆需與其他螢火蟲進行亮度比較，首先根據對方的距離及亮度求出相對亮度，當相對亮度大於本身亮度時，根據(15)式往亮處移動。而同時最亮的螢火蟲亦會隨機移動，以避免最佳化問題陷入局部解，至若隨機移動後的亮度變低，則最亮的螢火蟲飛回原位。

##### 步驟六：更新螢火蟲亮度

每隻螢火蟲經過互相比較及移動後，必須更新亮度，並從中選出亮度最大的螢火蟲成為新的優勢螢火蟲  $GBest$  及計算適應函數值  $GBFit$ 。

##### 步驟七：輸出計算結果

當完成以上步驟時，將最亮的螢火蟲適應值與疊代結果進行比較，倘若最佳適應函數值已達收斂或疊代次數與最大疊代次數  $ME$  相同，則停止疊代並輸出結果，此即等同於演算法已趨於穩態，輸出結果即為電纜

三相所需補償的電感值，並可用於評估補償前後之效能改善。

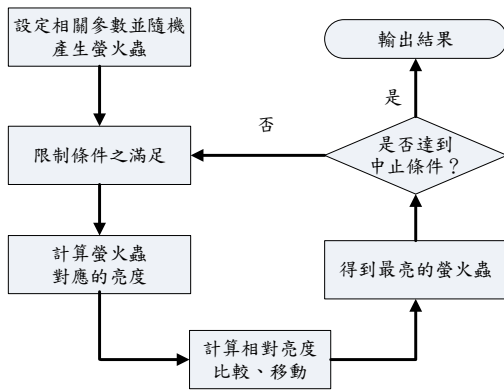


圖 6 螢火蟲演算法流程圖

### V. 測試分析結果

本文為期驗證螢火蟲演算法於地下電纜被覆循環電流之改善效能，係以兩條地下電纜線路分別測試 [8]，並以不同測試情形分別進行比較。在本文之測試案例中，智慧型螢火蟲的數量  $W$  分別設為 10 隻、20 隻、30 隻進行比較、螢火蟲間吸引常數  $\beta_0$  設為 1、空氣對光的吸收係數  $\gamma$  設為 1、螢火蟲隨機飛行係數  $\alpha$  設為 0.2 [14]，以上參數之設定，適用於本文所研究之課題，而對於不同應用時，則需審慎選定。

本文測試所使用之電纜系統概以圖 1 為例，電纜接地方式採以交錯接地方式，使用的電纜規格為 161kV 交連聚乙炔電纜，其電纜被覆之平均半徑  $r_s$  為 56.9mm、電纜被覆本身之電阻  $R_s$  為 0.0897  $\Omega$ /km，三相負載電流大小假設為 500A，至於電纜的排列方式及區間長度，將於各測試系統中列出。

#### 測試系統一：

測試系統一之電纜區間長度及排列方式，列如表 2 所示，其中三區段的排列方式皆採正三角排列，但因三個區段長度彼此不同，因此造成感應電壓不平衡，而本測試系統即在於探討區間長度不同所造成的被覆損失。於未接三相補償電感前，測試系統一之感應電壓分布如圖 7 所示，而 M3 感應電壓、被覆循環電流、三相被覆損失、及被覆損失，則詳列於表 3。

表 2 測試系統一各區間排列方式與長度

區間	M1至M2	M2至M3	M3至M4
區間長度(km)	0.3	0.25	0.2
電纜間距D(mm)	310	310	310
排列方式			

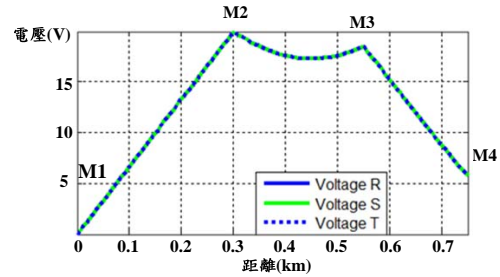


圖 7 測試系統一被覆感應電壓分布圖

表 3 測試系統一模擬結果

	R相	S相	T相
M3感應電壓(V)	17.7923	17.7923	17.7923
被覆循環電流(A)	47.2596	47.2596	47.2596
三相被覆損失(W)	150.22	150.22	150.22
被覆總損失(W)	450.66		

由圖 7 可看出，最大感應電壓發生在 M2 人孔的位置，因此在 M2 人孔上不適合再加入補償電感，以避免過高的感應電壓產生。至於本測試系統乃擇定於 M3 人孔换位處，加入補償電感，並透過演算法求得最佳的補償電感。表 4 列出螢火蟲演算法分別執行 10 次之各項統計結果，其中疊代次數皆設為 200，並以不同螢火蟲族群大小來比較收斂結果。當使用 10 隻智慧型螢火蟲時，雖有較短的平均演算時間，但求得之目標函數值較不穩定，且大約疊代 100 次才會收斂；而當使用 30 隻智慧型螢火蟲時，雖可能得到較穩定及較佳的目標函數值，且約疊代 20 次即可收斂，但由於螢火蟲數量較多時，恐需較多時間比較相對亮度及移動情形，導致程式執行速度趨慢；至於使用 20 隻智慧型螢火蟲時，則平均演算時間、目標函數值的穩定性、及收斂之疊代次數均介於兩者之間。

表 4 不同螢火蟲數目於測試系統一之各項統計數據比較

智慧型螢火蟲數目	10	20	30	
最佳目標函數數值	0.23528	0.23528	0.23528	
最差目標函數數值	0.23540	0.23530	0.23528	
平均目標函數數值	0.23531	0.23528	0.23528	
標準差	0.00004	0.00001	0.00000	
平均時間(秒)	0.38996	1.18543	2.54854	
最佳補償電感(H)	R相	0.00326	0.00328	0.00325
	S相	0.00324	0.00315	0.00328
	T相	0.00335	0.00331	0.00317
M3 感應電壓(V)	R相	22.7213	22.7232	22.7203
	S相	22.7194	22.7104	22.7232
	T相	22.7297	22.7261	22.7125
被覆總損失(W)	3.4665	3.5416	3.5663	

觀察表 3 及表 4 之模擬結果，當三區段皆採用正三角排列時，三相所需補償的最佳電感值大略相同，約為 3.3mH。而在使用補償電感後，三相感應電壓的增加幅度大致相同，且皆未超過 65V 上限。同時被覆的總損失量也在補償後，而有大幅降低之呈現。圖 8 為不同螢火蟲族群大小疊代 200 次之收斂曲線圖，由該圖觀察可知，當演算法中的螢火蟲族群越大時，目標函數值收斂越快，且較易得到較佳的目標函數值。

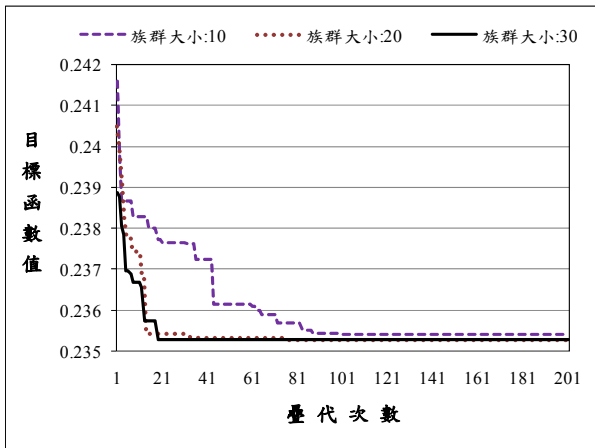


圖 8 測試系統一之收斂曲線比較圖

### 測試系統二:

測試系統二之電纜區間長列方式，詳如表 5 所示，M1 至 M2 區段的排列方式為三相並列，而 M2 至 M3 及 M3 至 M4 區段則均採以正三角排列，三區段長度皆設為 300(m)。本測試系統是探討因排列方式改變造成的被覆循環電流，並藉由串接補償電感以降低被覆損失。在未補償前，電纜三相之被覆感應電壓分布，繪如圖 9 所示，由於最大感應電壓發生在 M2 人孔位置，且串接補償電感會增加感應電壓，因此本測試系統選在 M3 人孔換位處加入補償電感，並透過演算法求得最佳電感量。

表 5 測試系統二各區間排列方式與長度

區間	M1至M2	M2至M3	M3至M4
區間長度(km)	0.3	0.3	0.3
電纜間距D(mm)	310	310	310
排列方式			

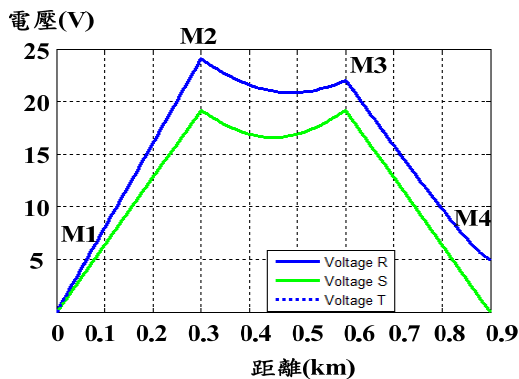


圖 9 測試系統二被覆感應電壓分布圖

由測試系統一之模擬結果可發現，使用 20 隻智慧型螢火蟲，大約疊代 30 次即可使本演算法收斂，故測試系統二亦採以 20 隻智慧型螢火蟲，並繪出其收斂曲線圖。於此系統二中，使用 5 個不同初始值疊代 50 次進行測試比較，模擬結果如表 6 所示，並將 5 個不同初始值之收斂曲線繪如圖 10 所示。另由表 6 及圖 10 可看出，無論螢火蟲的初始值為何，本演算法都可快速求得最佳補償電感及快速收斂至最佳解，演算過程之穩定性佳。

表 7 列出補償前後之模擬結果比較，其中三相補償電感係取自表 6 模擬結果的平均值，此三相補償電感分

別為 16.9mH、0mH、16.85mH。系統二中之區段長度相同，但區段使用的排列方式不同，因此仍造成 R 相及 T 相感應電壓不平衡，但透過補償電感的使用，足以大幅降低被覆損失；至於 S 相的終端感應電壓在未補償前為 0V，不會造成被覆損失，故不需要連接補償電感。此測試系統在串接補償電感後之感應電壓皆未超過法規上限，應可輔以說明本文所應用之螢火蟲演算法確可有效降低被覆循環電流及被覆損失，對於地下供電電纜輸送電能之改善，應有高度助益。

表 6 應用 20 隻不同初始值螢火蟲於測試系統二之模擬結果

	目標函數	演算時間(秒)	補償電感(H)		
			R 相	S 相	T 相
初始 1	0.1069	0.5966	0.0172	0	0.0167
初始 2	0.1069	0.5672	0.0168	0	0.0169
初始 3	0.1069	0.5759	0.0170	0	0.0168
初始 4	0.1069	0.5860	0.0169	0	0.0168
初始 5	0.1069	0.5757	0.0166	0	0.0169
平均	0.1069	0.5803	0.0169	0	0.01685

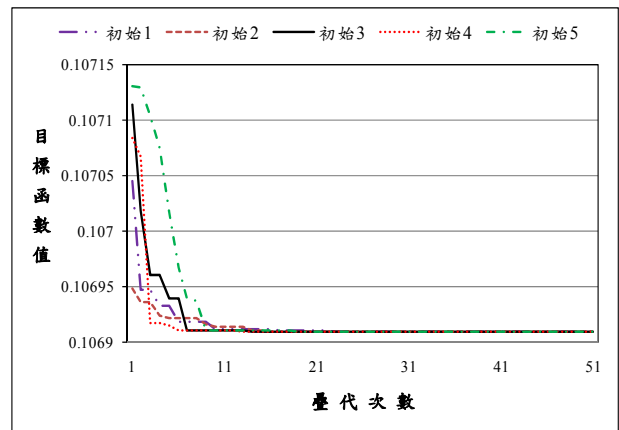


圖 10 應用不同初始值之收斂比較

表 7 測試系統二補償前後之模擬結果比較

		未接補償電感	串接補償電感
M3 感應電壓(V)	R 相	22.0365	25.4939
	S 相	19.1736	19.1736
	T 相	22.0365	25.4938
三相被覆損失(W)	R 相	87.6946	0.0459
	S 相	0	0
	T 相	87.6946	0.0462
被覆總損失(W)		175.3892	0.0921

## VI. 結論

本文應用智慧型螢火蟲演算法協助改善地下電纜交錯接地之被覆損失問題，同時經由實際系統予以測試驗證此方法之應用可行性，目前本方法於所探討之研究課題，確已展現優良之計算效能，未來可持續應用於求解其他電力控制及運轉相關問題，俾使本方法兼具學術價值及更符工業應用參考之需。

## VII. 誌謝

本文在部份測試討論中，承蒙臺灣電力公司研究先進悉心提供意見及熱誠協助，謹此敬致最誠摯之謝意。



### 參考文獻

- [1] H. E. Orton, and R. Samm, "Worldwide Underground Transmission Cable Practices," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 2, pp. 533-541, April 1997.
- [2] "IEEE Guide for the Application of Sheath-Bonding Methods for Single-Conductor Cables and the Calculation of Induced Voltages and Currents in Cable Sheaths," *ANSI/IEEE Standard 575*, 1988.
- [3] Handbook of Transmission Line Engineering, Taiwan Power Company, pp. 1-2-7-1~1-2-7-23, January 2004.
- [4] B. Novák, L. Koller and I. Bertal, "Loss Reduction in Cable Sheathing," *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Spain, March, 2010.
- [5] J. R. Riba Ruiz, A. Garcia and X. Morera, "Circulating Sheath Currents in Flat Formation Underground Power Lines," *International Conference on Renewable Energy and Power Quality*, Sevilla, Spain, March 2007.
- [6] K. Steinbrich, "Reduction of Operating Frequency for Power Cables," *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 12, Issue 3, pp. 235-238, March 2007.
- [7] H. Z. Ma, X. R. Ni, L. H. Li, and D.H. Wang, "Research on Compensation of Induced Voltage in the Metal Shield of the High-Voltage Power Cable," *High Voltage Engineering*, Vol.33 No.3, pp.148-151, March 2007.
- [8] C. K. Jung, J. B. Lee, J. W. Kang, X. H. Wang and Y. H. Song, "Sheath Current Characteristic and Its Reduction on Underground Power Cable Systems," *IEEE Power Engineering Society, General Meeting*, San Francisco, USA, Vol. 3, pp. 2562-2569, June 2005.
- [9] X. H. Wang, Y. H. Song, C. K. Jung and J. B. Lee, "Tackling Sheath Problems: Latest Research Developments in Solving Operational Sheath Problems in Underground Power Transmission Cables," *Electric Power Systems Research*, Vol. 77, No. 10, pp. 1449-1457, August 2007.
- [10] L. Yan, F. D. Peng, X. L. Chen, Y. H. Cheng, and L. Xu, "Study on Sheath Circulating Current of Cross-linked Power Cables," *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Chongqing, China, pp. 645-648, 2008.
- [11] X. S. Yang, "Firefly Algorithms, Stochastic Test Functions and Design Optimization", *International Journal of Bio-Inspired Computation*, Vol. 2, No. 2, pp. 78-84, 2010.
- [12] S. Lukasik and S. Zak, "Firefly Algorithm for Continuous Constrained Optimization Tasks," *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 5796, pp. 97-106, 2009.