

高 頻 電 流

在輸電線路保護中的應用

蘇聯 格·夫·米庫茨基著
黃家裕 沈贊垣 朱物華譯

燃 料 工 業 出 版 社

內 容 提 要

本書提要說明了下列問題：

1. 輸電線路在高頻通道繼電保護方面的設備和運行；
2. 高頻通道保護線路中所包括的全部主要元件的運行原理及技術特點；
3. 掌握電器運行原理所應知的導線上通訊的理論根據。

本書可供動力系統中的工程技術人員在從事輸電線路運行時的參考。

* *

高頻電流在輸電線路保護中的應用

ПРИМЕНЕНИЕ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

根據蘇聯國立動力出版社(ГОСЭНЕРГОИЗДАТ)
1953年莫斯科俄文第一版翻譯

蘇聯 Г. В. МИКУЦКИЙ 著

黃家裕 沈贊堦 朱物華譯

燃料工業出版社出版

地址：北京東長安街郵政工部局

北京市書刊出版業營業許可證出字第 012 號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編譯：陳惟清 校對：趙桂芬

書號319 * 電135 * 787 × 1092 1/32 開本 * 2 1/2 印張 * 68 千字 * 印1—5,000冊

一九五四年十二月北京第一版第一次印刷

定價4,400元

序

根據第十九次蘇聯共產黨代表大會的指示，在五年計劃完成時，熱力發電廠的容量應增加到兩倍左右，而水力發電廠的容量應增加到三倍左右。力能系統在容量方面的大量提高使得高壓輸電線路的數量和長度飛快地增長。由於這個緣故，作為保證力能系統運行的穩定性和工業企業供電持續性的主要因素之一的繼電器保護，在作用和影響方面是提高了。祇有高速的高頻保護，也就是說，祇有在被保護的輸電線路的導線中有高頻通道的保護，才能保證強大力能系統運行的穩定性。

高頻保護已在蘇聯使用了二十年以上，在烏拉爾力能系統中建立第一套高頻保護的符·伊·伊萬諾夫(В. И. Иванов)和普·伊·聶若夫(П. И. Рыжов)，是高頻保護的擬製和運用方面的先鋒隊員。

蘇聯在近年來擬製和廣泛運用新型的高頻保護，大大地超過了其他國家的保護，並且擬製和生產這些保護所需的新型高頻設備。

現時的高頻保護是大型力能系統中保護的主要類型。在許多系統中，近年來始出現高頻保護，而在某些系統中，高頻保護在1953—1954年中才開始運用。

掌握力能系統中的高頻保護是具有一定的困難的，因為在保護的高頻通道中設備的調諧和運轉是應由在力能系統保護上服務的工作人員來執行的，而他們却並不是電訊方面的專門人才。

本書簡述在蘇聯使用的相-地連接法中，高頻電流在三相線路中的傳送原理。書中敘述組成高頻通道的全部主要結點的運行，並且分析通道的可靠和穩定運行的條件。此外，對於高頻受訊-發訊器的主要線路也加以敘述。本書並不打算對設備運轉和校正給予指示，因而其中就不列出受訊-發訊器的全部線路圖。而祇附有易於瞭解全部設備及其個別結點的運行原理的簡化線路圖。書中說明瞭解設備運行所

必需的導線的電訊理論方面的某些知識。

著者在此對審閱原稿時給予寶貴意見的工程師葉·德·捷伊李德從(Е. Д. Зедлизон)和工學碩士雅·勃·裴霍夫斯基(Я. Л. Быховский)表示深切的感謝。

目 錄

序	1
Ⅰ. 高頻繼電保護通道概論	4
Ⅱ. 高頻電流在三相輸電線路上的傳送特性	13
Ⅲ. 加工設備和連接設備	20
Ⅳ. 高頻保護通道的運行特性	30
Ⅴ. ПБЗ-50型高頻受訊-發訊器	37
Ⅵ. 用 ПБЗ-К型石英穩定法的高頻保護的新型受訊-發 訊器	54
中俄譯名對照表	78

1. 高頻繼電保護通道概論

1. 高頻保護通道的用途

力能系統的發展以及高壓輸電線路數量和距離的增長，引起了建立能保證無延滯的斷開電網故障段的繼電保護的必要性。在裝設於被保護段兩端的兩套保護組同時動作的條件下，線路上任何處所的短路是可以從兩端瞬時斷開的。

在幾十和幾百千米長的線路中，就利用優質通道中特種信號的傳送來進行這種相互的作用（閉鎖作用）。這種保護得到高頻保護的名稱。

高頻閉鎖通道係用於下列情況中的：當外部短路時，使用比較線路兩端的功率或電流方向的方法來確定故障位於被保護段範圍外，因而防止斷開。

這樣一來，祇有在外部短路時，高頻閉鎖信號沿非故障線路的傳送是必需的。在被保護線路有故障時，就不需要傳送高頻信號。

當線路的某一端的繼電保護組明確的確定短路是發生在該線路上，而其另一端的保護根本可能不動作的情況下，也可利用信號從線路的該端傳送斷開的命令。在這種情況下，當被保護的線路有短路時，斷開信號是必須沿故障線路傳送的，該時，高頻通道的破壞是可能的。為了可靠地傳送斷開信號起見，就必須沿平行的線路或其他形式的聯系來重複信號。除此以外，高頻通道斷開信號對於干擾需要有很高的解調性，這樣，干擾就不能使受訊機構動作，並不引起線路的斷開。由於人屬於遙遠機械裝置類型的斷開信號通道是很複雜的高頻閉鎖通道，因而沒有得到廣泛的推廣。

2. 高頻保護的基本工作原理

在蘇聯，兩種高頻保護型式得到推廣：具有高頻閉鎖作用的方向

保護和相差動的高頻保護。

圖 1, a 表示方向保護的作用原理。

線路每一端的保護組包括啟動元件 HO ，功率方向元件 OH ，高頻受訊-發訊器，和受訊閉鎖繼電器 HP 。兩個高頻受訊器中的任何一個，既可以接收自己發訊器的信號，又可以接收線路另一端發訊器的信號。當電網中有短路時，兩側的啟動元件把發訊器接通，並準備好開關的斷開電路。斷開電路是被接在受訊管板極電路中的繼電器 HP 所控制。在有受訊電流時，就是說，假設有一個發訊器工作時，兩個受訊繼電器使斷開電路處於斷開狀態。在短路功率由匯流排流向線路

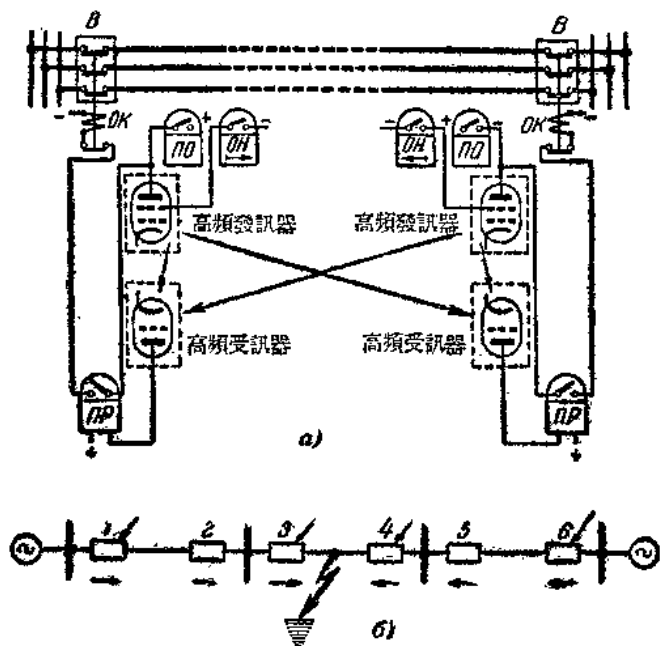


圖 1 濾波器式方向高頻保護的作用原理

a—用於線路的一段上；b—用於線路的幾段上；B—開關；OK—斷開線路；HO—啟動元件；OH—力能方向元件；HP—受訊繼電器；實箭號—功率的方向；虛箭號—方向元件阻止發訊器工作。

側的情況下，功率方向元件開始動作，該時方向元件用自己的觸頭來阻止發訊器工作。

在被保護區域內發生短路的情況下，兩端短路功率由線路側匯流排流向故障處所，因而兩端的方向元件就阻止發訊器工作。然後線路兩端的受訊電流停止，而線路由兩側斷開，因為啟動元件已準備了斷開電路，而高頻閉鎖作用停止了。

在外部短路情況中，方向元件祇在線路的一端動作。該時，有一個發訊器照舊工作並把線路兩端的保護鎖住。

圖 1,6 表示在高壓電網的幾段上有高頻閉鎖的方向保護的作用。在中間段有短路時，啟動元件開始動作並接通全部六個發訊器。但是祇有在故障段中方向元件從兩側來確定功率的方向是從匯流排流向線路側。該時兩端發訊器停止工作，因而故障段由電網斷開。在第一和

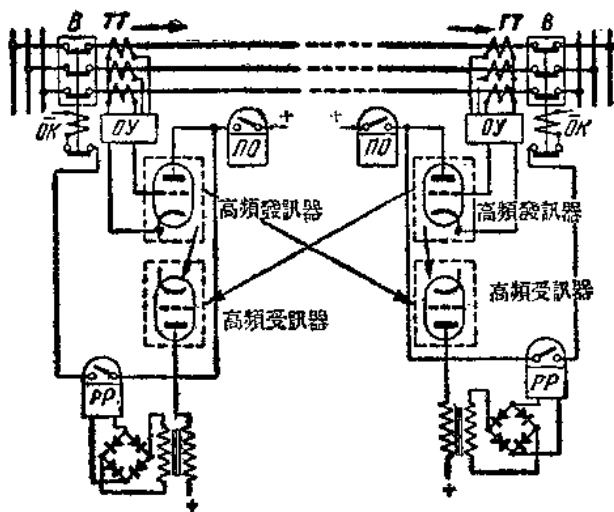


圖 2 相差動保護作用原理

OY—操縱元件；HO—啟動元件；OK—斷路線圈；PP—工作繼電器；B—開關。

第三段上半組保護組 2 和 5 中的方向元件確定被保護段範圍以外有短路存在(在裝置這些元件的處所, 功率是流向匯流排側的)。這些方向元件並不阻止發訊器工作, 因而高頻信號在各該段的對應端把保護鎖住。這樣一來, 在短路時只有發生故障的那一段是被斷開的。

現在已有幾種利用高頻閉鎖的方向保護裝置的類型。蘇聯的工業已經生產了火力發電設計局所擬製的 ПЗ-164 型高速濾波器式的方向保護裝置。這種保護裝置的特點就是採用了對稱分量濾波器, 啟動元件和功率方向元件的電能是由濾波器供給的, 因此得到濾波器式的名稱。

圖 2 表示相差動保護的作用原理。

保護工作是建立在比較被保護線路兩端工業頻率電流相位的基礎上的。把線路一端的電流相位傳送到另一端是沿高頻通道進行的。發訊器由啟動元件 IIO 啟動, 並被操縱元件 OY 操縱, 操縱元件用工業頻率電流來實現發訊器週期性的接通和斷開。和發訊器發出繼續信號的方向高頻保護不同之點是, 當相差動保護工作時, 高頻信號是由斷續形式傳送的, 並且每個信號的長度等於間隙(停止)的長度, 也就同時等於工業頻率的半週期, 這就是說, 發生了用工業頻率電流操縱發訊器的高頻電流。被操縱的高頻信號的相位是和在裝置發訊器的線路端的工業電流的相位相符合的。

爲了利用一個高頻通道來包括三相線路的保護, 採用了濾波器體系形式的綜合裝置, 把電流的三相系統變爲單相的。這些裝置是包括在操縱元件以內的。在外部短路時, 被保護線路的兩個操縱元件的輸出端上電壓是同相的。當被保護段短路時, 這兩個電壓的相位差接近 180° 的角度。

兩個操縱電壓的相位關係使得, 在外部短路時線路兩端的發訊器能在不同的工業頻率的半週期中工作。

每個受訊器可以接收兩個發訊器的信號。在受訊器中有把斷續的高頻信號變爲工業頻率交流電壓的機構。這個電壓被整流, 並供電給閉斷(工作)繼電器 PP 的繞組。工作繼電器的觸頭經過啟動元件的觸

頭而作用於開關的斷路線圈。

在被保護線路中有短路時，線路兩端發訊器同時工作。受訊器得到斷續的信號，它經過轉發後對工作繼電器的線圈發生作用，因而線路從兩端斷開。

當外部短路時，線路一端發訊器的信號間的間隙被從另一端接收到的高頻信號填滿。因此受訊器接到繼續的信號，因而工作繼電器就不作用。

大家都知道，有很多不同形式的相差動保護裝置。它們之間主要的區別是在綜合裝置的型式和受訊器的輸出端電流相位的比較結線圖上。

大家都知道，也有些相差動保護，它們不利用綜合裝置，而分別的比較線路每根導線中電流的相位。這些保護在每個被保護的線路上需要三個獨立的高頻通道。在蘇聯採用 $\Delta\Phi 3-1$ 型和 $\Delta\Phi 3-2$ 型的保護，這兩種保護是由蘇聯電站部中央科學研究所電氣試驗室擬製的。這些保護中的啟動元件和操縱元件是利用對稱分量濾波器的，因此這兩種保護也屬於濾波器式的類型。

相差動保護的高頻通道是屬於高頻閉鎖通道類型，因為在一端的發訊器停止工作的時間間隔中接收高頻信號就意味着保護的閉鎖。在沒有另一端的高頻信號時，一端的保護對斷開起了作用。

3. 高頻保護通道的線路圖

高頻信號的傳送與工業頻率電流的傳送是沿着輸電路中的導線同時進行的。

可按照高頻受訊-發訊器接到線路上的特點，使用幾種方法在輸電線路的導線中來傳送高頻電流，把受訊-發訊器接到線路的兩相上，就構成相與相間系統的通道。把受訊-發訊器接到線路的一根導線和地間就構成相與地間的通道。同樣地可以有其他連接的方法，例如：相與兩相間，不同線路的相與相間等等。

在相與地間系統的通道中，所需的設備數量最少，因此這系統在

蘇聯得到最廣泛的應用。高頻保護通道只是按照相與地間的系統而構成的。

圖3表示相與地間系統的高頻保護通道的線路圖。

高頻通道是由下列各元件組成的：

1. 被利用來傳送高頻電流通道的輸電線路的導線。
2. 阻止高頻電流流向變電站匯流排（就是說在線路的被保護段範圍以外的）的高頻阻波器 $B3$ 。高頻阻波器是一個對該通道的高頻具有很大的阻抗的諧振迴路。該迴路是在靠近變電站匯流排處接入輸電線路的強電流導線中的。
3. 把高頻電流傳到高壓線路的導線上的耦合電容器 KC 。
4. 作為高頻電纜與耦合電容器間的聯系環節的連接濾波器 $\Phi\Pi$ 。

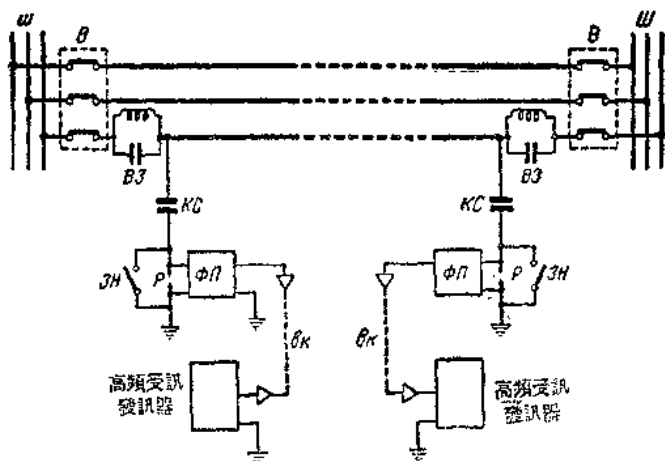


圖3 高頻保護通道的線路圖
B—線路的開關；III—變電站的匯流排。

連接濾波器與耦合電容器一起構成通過某高頻頻帶的通帶濾波器。在這個頻帶範圍內，連接濾波器好像補償了耦合電容器的高頻電流的電抗。此外，在工業頻率電流方面連接濾波器把耦合電容器的下電極連到地上，因而實現了高頻電纜輸入阻抗與線路輸入阻抗的配

合。

5. 高頻電纜 BK ，它把高頻電能從裝置受訊-發訊器的處所(通常為發電廠或變電所的控制屏)傳送到裝耦合電容器的處所，就是說，把耦合電容器接到線路導線上的地方。

6. 傳送和接收高頻電流的高頻受訊-發訊器。

7. 在耦合電容器旁的保護機構，它防止高電壓從輸電線路方面擊中高頻電纜和受訊-發訊器。保護機構是由與連接濾波器的線路繞組並聯的避雷器 P ，和接在地與耦合電容器下電極間的接地開刀 $3B$ 所組成的。在檢修連接濾波器時，就需要接地開刀來把耦合電容器的下電極接地。

高頻阻波器，耦合電容器，連接濾波器和高頻電纜是輸電的加工和連接設備。

4. 高頻保護通道的特性

在原則上，高頻保護通道既可以在高頻電流繼續流通條件下工作，也可以祇在短路時期接通高頻發訊器的條件下工作。在第一種情況下，發訊器不斷的把高頻電流發送到線路中去。在第二種情況下，發訊器始終不作用，而只是在啟動元件啟動後被起動的。

繼續流通的系統比起在短路時接通的系統是有某些優點，因為該時它能不斷地控制高頻通道的完整性。但這些系統的嚴重缺點是該通道頻率對力能系統的其他高頻通道的干擾作用的增高，因而發訊器中真空管的損壞就加快了。在蘇聯現時只採用在短路時接通的發訊器系統。在其他國家的實用中繼續流通的系統得到某些推廣。

用作高頻保護通道的頻率範圍是 50—300 仟赫。這範圍是一般地使用在沿輸電線路的一切高頻聯系中，並包括訊道和遙測機械的通道。由於加工設備和連接設備在頻率低於 50 仟赫時實行上的複雜性，低於 50 仟赫的工作頻率的採用是有困難的，因為當頻率降低時，高頻電流和工業頻率電流分開的問題就複雜化了。

採用高於 300 仟赫的工作頻率，就牽連到線路中高頻能量衰減率

的大量增長問題，因為線路中能量損耗是隨着頻率的增大而提高的。然而現在有擴大工作頻率的範圍超過 300 到 400—500 千赫的趨向。在短線路上採用這些頻率是可能的。

高頻保護通道是沿輸電線路的高頻通道中最短的，因此它具有最小衰減。這些通道總是被兩個相鄰變電站間線路的一段所限制，這就是保護通道長度不大的緣故。訊道或遙遠機械的通道通常是要擴大到線路的幾段，因此是具有很大的衰減。訊道和遙遠機械通道中的大量衰減就使我們必需為這些通道選擇最低的工作頻率。因此保護通道的工作頻率通常是在指定範圍的上面部份中選擇的（高於 100—150 千赫）。

在 1941 年以前，力能系統中高頻通道的總數是不大的，因而在各個通道中，頻率的選擇是沒有任何嚴重困難的。現在高頻通道網路大為增加，以致在新高頻通道中頻率的選擇已發生困難。近年來在所有力能系統中已擬定，要更大地提高高頻通道的數量。這就產生了根據減小通道間的相互影響來製定專門方法的必要性。在發訊器中使用石英頻率穩定法和在受訊器中使用狹帶濾波器就是減小高頻頻帶的最有效方法。狹帶濾波器能把鄰近的不同通道的工作頻率分開，並且使這些通道相互間沒有顯著的影響。

根據作用原理，高頻保護設備比起通訊或遠距離機械設備要簡單得多。但是保護設備要具備下列幾個特性：

a) 需要很高的可靠性。設備工作中所必需的可靠程度是直接地由設備不正確的動作或保護裝置的不動作所造成的後果來決定的。在重要的線路上的不正確的保護動作能造成大工業區域的停電，或者甚至造成力能系統的瓦解，因而產生巨大的損失。

b) 設備是日日夜夜接入的，並且必需在任何時刻準備動作。因而設備是不許可由交流電網供電的，因為當短路時變電站所用的電壓可能降低，或甚至消失，這樣就使該變電站全部高頻保護裝置停止運行。因此保護用的受訊—發訊器是從直流電壓為 110 伏或 220 伏的蓄電池組來供電的。

蓄電池組的供電就要求所有全部結線回路的絕緣對接地外殼具有高的絕緣強度。另一方面，相當低的電壓數值特別限制了受訊-發訊器所採用的真空管的類型，並且不可能使真空管處於最優越的運轉情況。

爲了檢查高頻保護通道的完整性起見，實際運用中規定了採用把儀器讀數記錄在操作簿上的方法，在每一個保護通道上每天交換高頻信號。交換信號是在線路兩端輪流接通發訊器，並且記錄從兩端發訊器送來的受訊電流的數值。

此外，受訊-發訊器中具有繼續控制真空管絲極電路完整的裝置。當任何一個真空管絲極電路燒壞時，以及當供給受訊-發訊器的電壓消失時信號鈴和信號燈就動作起來。

受訊-發訊器既可裝置在變電站的露天部份，也可裝置在變電站室內繼電保護屏上。在變電站的露天部份，受訊-發訊器直接裝在耦合電容器的支柱上。該時，在繼電保護屏上祇裝發訊器的啓動按鈕和每天交換信號時指示受訊電流所必需的毫安計。在把受訊-發訊器在變電站露天部份的情況下，不需要連接濾波器和高頻電纜，這就使通道各方面的高頻能量損耗減少一些。但是這種裝置使運轉大爲不便，這是因爲必須在露天進行檢修工作的緣故。此外設備在露天下日日夜夜的工作，要求複雜的設備結構和設備的生產技術。因此蘇聯只製造室內裝置的受訊-發訊器。在現時，即使專供戶外裝置用的受訊-發訊器也常裝在變電站室內。

在蘇聯第一種高頻保護用的受訊-發訊器是在符·伊·伊萬諾夫和普·伊·霍若夫指導下並在以斯摩羅夫教授命名的實驗室中擬製和生產的。這種受訊-發訊器在斯魏爾德洛大力能系統中得到最廣泛的應用，該處直到現在還是運用這種受訊-發訊器。

在1940年克魯格里雅柯夫工程師小組在「紅色曙光」工廠擬製了一種保護用的受訊-發訊器，按參數它超過了斯摩羅夫實驗室和西屋公司的設備。這種受訊-發訊器表現出很好的運轉質量。但是在衛國戰爭開始時它的生產停止了。

在1948年擬製了ПВЗ型受訊-發訊器，連接濾波器和高頻阻波器的調諧元件。這種受訊-發訊器的生產從1948年開始，繼續到1952年。

在1950--1952年間，蘇聯電站部中央科學研究所電氣試驗室在作者指導下擬製了新型的ПВЗ-К型受訊-發訊器，在發訊器中採用了石英頻率穩定法，並在受訊器中採用狹帶濾波器。從1952年起這種受訊-發訊器代替了ПВЗ型的受訊-發訊器開始大量生產。在恩·耳·磊巴柯夫指導下掌握了ПВЗ-К型受訊-發訊器的技術。

電站部力能系統中的工作人員姆·阿·茹羅奇柯，夫·伊·勒奧諾夫，姆·恩·潘京等，在蘇聯高頻保護通道的技術發展方面和這些通道設備的改進方面起了很大的作用。

II. 高頻電流在三相輸電線路上的傳送特性

1. 作為訊道的三相線路的特性

輸電線路的結構完全決定於最有效地傳輸工業頻率電流的要求。利用高壓線路作為高頻通道是附加的設施，因此，高頻通道的設備要適合於規定的線路結構。

輸電線路的高度絕緣水平，支柱機械強度和大的導線截面是高頻通道在這條線路上的高度可靠性的先決條件。高頻通道在高壓線路上的高度可靠性，是任何通訊線路所不可比擬的。

此外，輸電線路利用作為高頻通道是具有一系列的困難，如：

а) 由於線路上工業頻率高壓的存在所引起的高度電干擾。高頻的干擾是由導線的電暈和高壓絕緣子表面的局部放電而引起的。高壓電網的操作轉接也在高頻設備中引起很大的干擾。通常稱為L操作的干擾是很短促的，因此，在高頻通訊上不發生顯著的影響，但是對保護通道却是極重要的，因為它可能是保護閉鎖作用發生錯誤的原因。

б) 由於線路上工業頻率高壓的存在，就需要其中損耗一部份高頻能量的特殊加工設備和連接設備。這種設備的製造和裝置就牽連到

龐大的費用。因此，輸電線路上的高頻通道的裝置比起保護的輔助導線的敷設，只有在 10 千米以上的線路中，經濟上是合算些（電纜線路通常也作為通訊和遙遠機械方面的應用）。

в) 在高頻通道運轉中需要顧及進行檢修上的困難，因為線路是經常地的高壓下通行的，為了檢修阻波器或耦合電容器而拉去電壓是很困難的。

2. 高頻能量的衰減

在沿線路傳送高頻電流時，一部份高頻能量損耗在線路的導線中和地中。在把高頻能量由發端向受端傳送時，其損耗量是由高頻通道的衰減來決定。

在一般情況下，可把圖 3 線路中的由發訊器向受訊器的全部傳送線程，表示成損耗一部份發訊器能量的四端網絡 A 的形式。圖 4 就表示這種傳送線路。

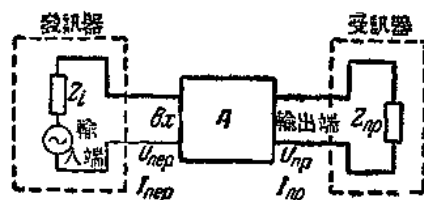


圖 4 傳送線程的方塊圖

A—四端網絡； Z_i —發訊器的內阻抗； I_{nep} —發訊器的電動勢； Z_{np} —四端網絡的負載阻抗（受訊器的輸入阻抗）。

包括高頻傳送線程的任何四端網絡的衰減是由發訊器方向的輸入功率對受訊器的輸入功率比值的自然對數的一半來決定的，就是說，

$$b = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{nep}}{P_{np}} = \frac{1}{2} \ln \frac{U_{nep} I_{nep}}{U_{np} I_{np}}, \quad (1)$$

式中 P_{nep} ——發端視在功率的數值；

P_{np} ——受端視在功率的數值。

奈波是衰減的單位。當四端網絡的輸入功率比輸出功率大 e^2 倍時，就是說 $P_{nep} = 7.4 F_{np}$ 時，四端網絡就具有 1 奈波的衰減。

如果四端網絡的輸入阻抗等於四端網絡輸出端的負載阻抗

($\frac{U_{nep}}{I_{nep}} = Z_{np}$)，那末，衰減就可由四端網絡輸入端和輸出端上的電

壓或電流比值的自然對數來決定，就是說：

$$b = \ln \frac{I_{nep}}{I_{np}} = \ln \frac{U_{nep}}{U_{np}}. \quad (2)$$

在這種情況下，1 奈波的衰減相當於四端網絡輸出端的電壓比輸入端的電壓低 e 倍（也就是說前者為後者的 $1/2.72$ ）時的減低。

上面已經指出，保護通道的高頻設備是接在輸電線路的相和地的電路間，就是說，一根導線和地之間。雖然如此，另外二根導線在高頻電流傳送時仍起重要的作用。由於各相間以及相和地間具有電容和電感的耦合的緣故，部份高頻能量就轉移到未裝置設備的二相上，因此，這兩相就被用做高頻電流的返回導線。

因為高頻電流是沿着三相系統導線上傳送的，它和工業頻率的電流一樣，是可以由幾個對稱分量的形式來表示的：在三個相和地間流動的零序分量，在相間流動並且形成相間波的順序分量和逆序分量。

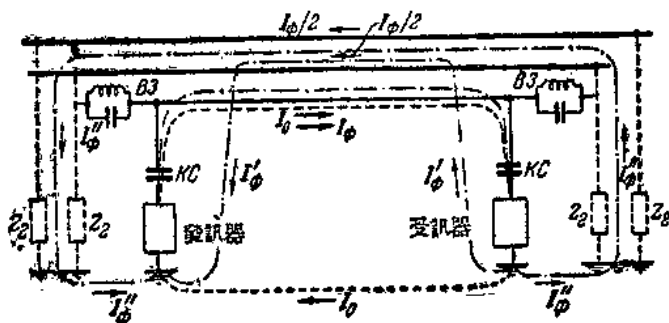


圖 5 高頻電流沿三相線路的流動

$B3$ —高頻阻波器； KC —耦合電容器； Z_2 —每一未裝置設備相對地的阻抗。