

# 直 流 輸 電

苏联 雅·姆·柴尔凡念吉斯著

電 力 工 業 出 版 社

# 直 流 輸 電

苏联工学碩士雅·姆·柴尔凡念吉斯著

倪 保 珊 譯



## 內 容 提 要

本書系苏联科学院出版社出版的“近代科学总结与问题”丛书之一。全书分十一章，阐述有关直流输电的各项技术问题，如高压直流输电设备中的量计、整流器与反流、直流输电的故障及其防御等问题。书中并指出今后直流输电的发展方向和直流输电制与三相交流输电制的比较。苏联在研究直流输电方面的卓越成就在本书中也有论述。

本书可供高等工业学校动力专业作为参考教材。

Я. М. ЧЕРВОНЕНКИС

### ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

АН СССР    МОСКВА    1948

## 直 流 输 电

根据苏联科学院出版社1948年莫斯科版翻译

倪保珊译

\*

158D50

电力工业出版社出版(北京府右街26号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第082号

北京市印刷一厂排印    新华书店发行

\*

787×1092 $\frac{1}{2}$ 开本 \* 48印张 \* 106千字 \* 定价0.82元

1955年2月北京第1版

1957年4月北京第2次印刷(4,001—6,530册)

72.181  
1

## 目 錄

第一章	遠距離電力輸送	2
第二章	矯整直流的輸電系統	15
第三章	整流器和反流器	24
第四章	高壓整流接線圖	39
第五章	反流	54
第六章	高壓換流器的柵極控制、調整、接通和切斷	63
第七章	直流輸電的故障及其防禦	75
第八章	高壓直流輸電設備中的量計	88
第九章	直流架空線路和電纜線路	96
第十章	直流輸電制和三相交流輸電制的比較	107
第十一章	蘇聯的高壓直流輸電	118
	中俄譯名對照表	124

[……進行科學研究及實驗工作以實現用高壓  
直流的遠距離電力輸送……]

(1946—1950年恢復並發展蘇聯國民經濟的五年計  
劃法令——1946年「莫斯科工人」出版局出版，第21頁)

## 第一章 遠距離電力輸送

自古以來，人類迫使自然力替自己工作：起初利用降落水的力，以後利用蘊蓄在煤中的能。但人類祇能在直接裝置着蒸汽機或水輪機的附近始可利用這種能，而這些地點離原動機的距離都不能超過傳動軸或傳動皮帶的長度。在這種條件下，祇有地球上微小部分的動力富源獲得了利用，換言之，祇有微小部分的體力勞動能被機器的工作所代替。爲了要使自然力變成全人類的財富，減輕在城市中或鄉村中、在工業上或日常生活上人類的勞動，必須解決將力能輸送到很遠距離的問題，輸送的距離甚至超過最現代化機械傳動裝置作用半徑的百倍千倍。

原則上，在發明電流以後這個問題是可以解決的，因為電流可以在導線中(理論上)輸送到無限制的遠處。電流的此項特性，已在十九世紀的初期被利用來作長途的信號傳輸——電報。在六十年內，電報的電纜網絡不僅聯系了各個國家，而且也聯系了各個大陸。但從傳遞信號進展到傳輸相當功率的電流相差甚遠。在電纜芯子中通過微小的電流，用來傳遞電報已很足夠；反之，欲使電動機轉動，或即令房屋以電光照明，必須有較大的電流在導線中通過。實驗指明：欲在長導線中輸送較大功率的電流時，大部分的能量消耗於無用的導線發熱上，而祇有一小部分的電能到達用戶。當然，如果按電流大小與輸電線長度成正比地增大導線的截面，可以限制損耗的能量在許可的範圍之內；但是當輸送距離

超過1—2公里時，這種方法顯得不經濟。怪不得當時有很多人認爲將電能輸送到遠距離的理想是不能實現的幻想。

七十年來，電流的應用範圍獲得了迅速的發展。契可列夫(В. Н. Чиколев)<sup>①</sup>發展了俄國物理學家楞茨(Э. К. Ленц)<sup>②</sup>的理想，同時證明了直流電機的可逆性，並開始奠定了電機用作原動機的實用意義。傑出的俄國發明家亞勃羅契可夫(П. Н. Яблочков)<sup>③</sup>創造了世界上第一個電氣光源，這光源獲得了廣泛的實際應用。幾年後，俄國的另一發明家洛特琴(А. Н. Лодыгин)<sup>④</sup>所發明的白熾燈代替了「亞勃羅契可夫電燭」並經愛迪生(Т. А. Эдисон)加以改善。從此迫切需要在供應公共用電的中心發電廠中進行電能的生產，並將電能輸送到相當遠的距離。

這個理想，於1876年被天荒地由彼得堡工程師匹露次基(Ф. А. Пироцкий)<sup>⑤</sup>在他的「關於靠水力發動機驅動發電機所得的電能輸送到任何遠的地方」論文中明確地具體化了。匹露次基建議用鐵路的軌道代替特殊的大截面導線來輸送電能。同年，匹露次基創造了用低壓直流沿西斯特羅里次基(Сестрорецкий)鐵路的軌道將電能輸送到3.5公里距離的當時記錄。

匹露次基的可以沿軌道代替大截面導線通過電流的理想，以後在電氣牽引上應用了；但是遠距離輸電的技術却向另一途徑——應用高壓電流的途徑——前進。

這一新途徑，在1880年首先由拉欽諾夫(Д. А. Лачинов)<sup>⑥</sup>指出。

俄國的科學家在分析直流電機的效率時，強調指出：提高電

---

① В. Н. 契可列夫(1845—1898)是蘇聯「電氣」雜誌(Электричество)的發起人，探照燈理論的發明者。

② Э. К. 楞茨(1804—1865)確定電流熱效應定律及感應電流定律。

③ П. Н. 亞勃羅契可夫(1847—1894)電燭與變壓器發明者。

④ А. Н. 洛特琴(1847—1943)白熾燈發明者。

⑤ Ф. А. 匹露次基，第一根電力輸送綫的製造者，他推動世界上第一輛電車。

⑥ Д. А. 拉欽諾夫(1842—1902)輸電線路的創造者——譯者。

機的速率及繞組匝數(換句話說即提高電壓) [可以在一定的電流強度下輸送更多的功]。如果按照輸電線導線電阻的平方根來選擇電壓, [則效率與電阻無關, 顯然不必就心經濟上的不利, 可以將功能輸送到很遠的距離]。

拉欽諾夫的論文在廣大的工程師界並未獲得任何評論。十五個月以後, 法國物理學家馬爾雪里德普列(Марсельдепре)以更堅決的姿態發表了類似的思想, 德普列肯定: 如果輸電電壓選擇得足夠高, 即使沿通常的電報線路輸送較大的功率到幾十公里的距離, 損耗的電能將不致過大。德普列的見解, 對目前任何一個電氣技術人員來說是十分清楚的, 但是却沒有得到他同時代人的十分信任, 而且大多數的專家竟認為是毫無根據的幻想。這種態度, 如果我們回想一下在當年還沒有完成高電壓的電機、變壓器和高壓線路用的絕緣子, 就不難理解了。

但是所有這些困難並不能阻止這勇敢的科學家。德普列於1882年在閩興(Мюнхен)的國際展覽會上表演了57公里的電力輸送。用裝置在米斯巴赫(Мисбах)煤礦中的直流發電機產生電流, 然後沿通常的電報線以1500—2000伏的電壓將電流送到閩興。在線路的受電端裝置了一座電動機, 使裝飾噴水泉的水泵轉動。

德普列勇敢的實驗, 立刻受到那個時代先進天才的極高評價。在他的第一次實驗後不久, 馬克思指出: [這個新發現使利用巨額的水能成為可能, 到目前為止這巨額的水能已成為無代價的恩物。] 幾個月後, 恩格斯給貝恩斯坦(Бернштейн)的信中寫道: [在德普列的新發現中, 在比較小的能量損耗下, 很高電壓的電流可以由普通的電報線路將電能輸送到這樣遠的距離, 而且始終沒有夢想到還可以在線路的末端使用——雖然這還是在萌芽中——這個發現徹底地解除了地方條件加在工業上的一切限制。使利用最遙遠地方的水力成為可能, 而如果它在開始時僅有利於城市, 以後它必然會變成消滅城鄉間對立的最有力的槓桿, 同時十分明顯, 由於這一發現, 生產力將無限增長, 使資產階級

愈來愈無法控制這種生產力。 | ①

由米斯巴赫——閱興間的線路所輸送的功率不大：一共僅 2 匹馬力。導線中的損耗却很大，達 78 %。爲了要增加輸送的功率，並減少損耗，必須改用更高的電壓。經過德普列第一次試驗後一年，開始製造 6000 伏的直流發電機與電動機。並試送 300 匹馬力到 112 公里的距離。但製造這樣高電壓的直流電機，即使在目前的電機製造上也是一項重大的困難任務。因此很自然地德普列的電機，運轉得不十分可靠。顯然，爲了將較大功率經濟地輸送到遠距離所需要的高電壓，不可能直接從一座直流發電機獲得。

芳建(Фонтен)試圖克服這項困難，將幾座直流發電機串聯，也就是將幾座直流發電機的電壓累加起來；在線路的受電端同樣也將幾座電動機串聯。根據芳建這個原理，實現了 100 匹馬力輸送到 50 公里的距離，效率爲 50 %。和上述的輸電線路一樣，也藉直流輸送。

但是在 1885 年，直流線路已有了頑強的敵手。因爲在 1876 年亞勃羅契可夫已提出改進變壓器的意見，可以用下列方法輸送電力：發電機發生低壓的電流，然後將電壓用變壓器升高到數千伏，電流在高壓下由線路輸送。在線路的受電端，重新將高電壓降低到供給照明網絡所需要的電壓。當然，這種輸送電力的方法必須採用交流，因爲直流不允許變壓。交流在當年僅能用來照明；單相的交流電動機尚未發明，而三相電流更未爲人們所知。到 1884 年，加利略菲拉利斯(Галилео феррарис)才證明在理論上製造交流電動機的可能性；但是在菲拉利斯研究的過程中，他得出了一個錯誤的結論：交流電動機中的損耗，在原理上不可能小於 50 %。交流電動機這樣大的能量損耗使當時絕大多數的工程師們毫不感到實際的興趣，但他們也不敢對這位意大利的科學權威作爭辯。在這種條件下，交流輸電線的應用範圍似乎十分有

① [馬克思恩格斯選集]，俄文版，第 27 卷，第 289 頁(1935)。



限。

輸電技術的繼續發展，是與優秀的俄國電氣技術革新家多利沃-多勃羅沃爾斯基 (М. О. Доливо-Добровольский)<sup>①</sup> 的名字有着密切關係的。

多利沃-多勃羅沃爾斯基於1862年1月3日在聖彼得堡 (Санкт-Петербург) 誕生。他早年就對技術與科學試驗工作發生興趣，在十八歲時入利日斯基工業大學 (Рижский политехнический-институт) 求學。但一年以後，沙皇被害，1881年多勃羅沃爾斯基被懷疑為同情於正在成長中的革命運動的人物，而被非法開除，並被剝奪了進入其他俄國高等學校的權利。為了繼續自己的教育，年青有為的多勃羅沃爾斯基不得不離開沙皇統治的俄國，但他仍保持着俄國國籍，直到他最後在世的日子，始終與自己的祖國不失去生氣勃勃的聯繫。終於在德國結束了他的求學，並不久在德國的電氣工業中擔任了要職。那時他創造了三相交流制，這一制度後來對於所有強電流電氣技術有決定性的意義；他又發明了三相異步電動機，到今天仍為最簡單可靠廉價的電動機。從此三相交流輸電制就成為動力工程中廣泛運用的先決條件。

1891年，多利沃-多勃羅沃爾斯基在法蘭克福爾特 (Франкфурт) 舉行的國際展覽會上，着手完成了將300匹馬力的功率從裝置在拉烏芬城 (Лауффен) 不大的水力設備由175公里長的三相線路送到展覽會的地區。預定採用的電壓是當時的記錄，為三相15000伏。這位發明家與他的工作同志們必須在空曠的地點建立起幾乎近代電力輸送上所有的元件，從三相發電機和三相變壓器開始，一直到架空線路用的針式絕緣子。

多利沃-多勃羅沃爾斯基不顧大多數專家的悲觀看法，專家們預料多勃羅沃爾斯基的試驗將全部破產，但輸電試驗終於得到了光輝的結果。輸電線順利地經過降壓變壓器供給了電動機與照

---

<sup>①</sup> М. О. 多利沃-多勃羅沃爾斯基 (1862—1919) 是三相交流的創始者，感應電動機與三相變壓器的發明者。

明負荷，而且輸送的效率竟達 77 %。

拉烏芬-法蘭克福爾特線路的開始運行，奠定了三相電流在遠距離輸電工程上霸權的新紀元。此後，逐年在歐洲及美洲出現了無數的高壓三相輸電線路。近 1900 年時，三相線路的電壓已增高到 60 000 伏，而其作用距離已提高到 250 公里。

但是，直流的擁護者却並不屈服。瑞士工程師塞雷(Тюри 英文名, Thury——譯者)大大改進了直流發電機與電動機的串聯系統，並提高了直流輸電的運行可靠性。由勞建系統輸送電力時，若串聯在電路中的任何一座電機發生故障，足以使整個的輸電系統失去工作能力。塞雷建議在每座電機上並聯一個特殊的設備——短路器。若電機發生故障，短路器即自動將此損壞的電機自線路上切斷，同時它自己將連接該電機的兩端短路，如是電路不致中斷。由於短路器的作用，可以將任何電機從線路上切斷或重新接上，而不使電路斷開。

通常的直流與交流的輸電線路。在某一維持不變的規定電壓下運行時，線路中電流的大小隨電力負荷的大小而變。塞雷認為若將電機串聯，這樣的運行方法是不適當的。實際上，當短路器將一座或幾座電動機自線路上切斷時，其餘串聯着的電動機將受到過高的電壓，電動機因此很容易失去工作能力。所以塞雷在他的電機上均添裝自動調整器，以維持電流值不隨負荷而變化，同時使線路的電壓隨負荷而正比地變動。這樣，切斷部分電機將不致引起輸電運行條件的破壞。

在塞雷線路的受電變電所中，電動機可以經電氣絕緣的聯軸節，或驅動機械傳動軸，或驅動低壓的直流發電機及交流發電機，再由這些發電機分別供應當地的電力網絡。

塞雷造成了在運轉上富於彈性而且很方便的直流輸電系統，此種系統比過去的直流輸電線系統能在高得很多的電壓下可靠地運行。20 年中，在歐洲各國都按照這種系統完成了 15 條輸電線路，其中在巴吐米城(Багуми)的一條較小的線路，長 10 公里。

塞雷制直流輸電線路中，規模最大、技術上最完善的一條線

路，是法國阿里巴赫 (Альпах) 慕吉 (Мутье) 水力發電廠與里昂城 (Лион) 間的輸電線，該線在 1906 年投入運轉 (圖 1)。最初該線路以不到 57 000 伏的電壓運行，輸送不到 6300 匹馬力的功率至 180 公里的距離。最後 4 公里的線路——在里昂城內——用

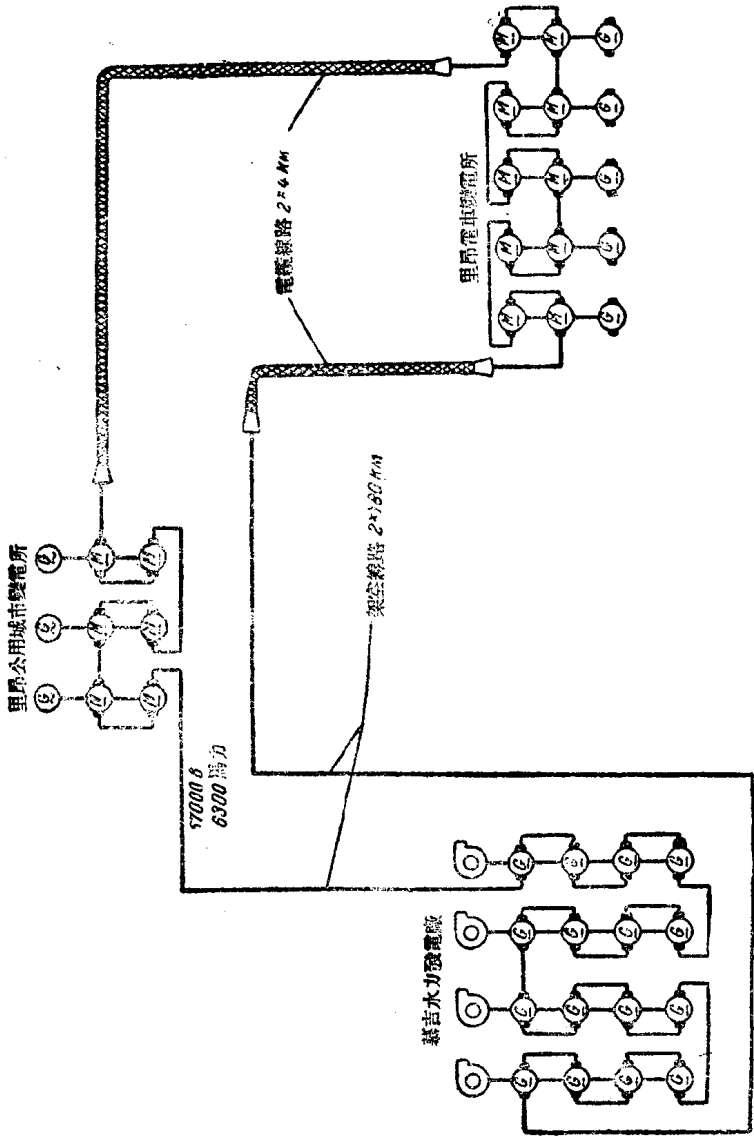


圖 1 按察雷制自慕吉發電廠到里昂的輸電線 (圖內未表明一切輔助設備)

地下電纜敷設。

慕吉發電廠中的每座水輪機，驅動二座裝置在絕緣基礎上的成對的直流發電機。在機器間內，與發電機並排建築着帶有短路器及量計儀器的絕緣柱子。這些機器的啓動方法頗爲特別：在啓動時，將發電機短路，並通入電流，按照水輪機的加速度逐漸增加電流。當發電機的電流與線路中的電流相等時，司機員扭轉短路器，將發電機串聯入電路。然後轉動直流發電機換向器上引出電流的電刷，電刷上電壓達到需要值後，水輪機即已載荷。在停車時，次序相反，轉動電刷使直流發電機的電壓等於零後，將發電機短路，並自線路切斷。

在里昂城內，設有二所收受電能的變電所。在變電所內裝置着串聯接入線路的高壓電動機，經絕緣聯軸驅動低壓的發電機。一所變電所內的發電機以交流供給城市的公用網絡，另一變電所的發電機發出直流供給電車。

1927年該線經徹底重建。在線路上，自慕吉發電廠又順次地接入了兩所水力發電廠：羅捷也耳（Розьер）水力發電廠和維尼奧坦（Биьотан）水力發電廠。線路又增加了80公里，電壓提高到125 000伏，輸送的功率達19 000瓩。

慕吉—里昂間輸電線的運行經驗證明，高壓直流的輸電線路運行極爲可靠。特別是裝在線路上的針式絕緣子能够可靠地承受直流的高電壓，而這種絕緣子僅能用於不到45 000伏的交流電壓。

在里昂城內電纜段線路的運行經驗，更值得特別重視。電纜經過30餘年的運行，從未發生過一次故障，也未曾修理過。運行的結果，非但它的絕緣性能絲毫不降低，甚至顯得比敷設時的情況更良好。這個結果決不是任何用交流電纜運行的電力系統所能誇耀的。根據直流電纜有利的運行經驗，在1927年決定將山岳區內常常易受雷雨故障的架空線段換用78公里長的地下電纜。更換的新電纜段，也工作得毫無毛病。

慕吉—里昂間的輸電線路是塞雷制的最後一次勝利。由於

發電廠的功率迅速增長，低速的蒸汽機迅速為高速的汽輪機所代替，於是要求電機製造工業製造數萬瓩的大容量發電機，其轉速達每分鐘 3000 轉——所謂汽輪發電機<sup>①</sup>。其實，具有十分複雜而在機械上較不牢靠的換向器的直流發電機，根本不能將它製造成大容量或足夠高的速率；所以汽輪發電機只能製成用交流的。藉三相線路連接在發展迅速的電力系統中的新建發電廠，均裝備汽輪發電機。於是三三相的發電廠與電力網處處排擠了舊有的直流和單相設備。塞雷制的線路逐一拆除或改用三相交流送電。在所有其餘的線路改建以後，只剩下慕吉一里昂間的直流輸電線在運行，並被不斷增長的三相交流網絡所包圍。終於在 1937 年這輸電線不再存在，而為三相線路所代替。直流和交流輸電制間鬥爭的第一個回合，由三相電流獲得勝利而告結束。

但是這個勝利並不持久。隨着發電廠功率及輸電線長度的繼續增長，很顯然，用三相電流輸送電力的距離還是有限度的，而且電氣工作者已緊緊地接近了這個限度，並在不久的將來應採用新的方法來越過這個限度。

限制交流電力輸送距離的基本因素是輸電的穩定性。當兩個電力網絡以交流線路相互連接時，兩個網絡必須同步運行——在兩個網絡中的交流頻率（週波數——譯者）應絕對相等。接通這樣的連絡線路以前，控制系統運行的調度員應將兩個網絡內的汽輪機轉速協調起來，俾使線路兩端電壓的頻率與相位都相等；這一複雜的運行手續稱為整步（又稱同期——譯者），它需要高度的技術修養與完善的設備。線路接通後，此線路即應保證與其所連之網絡作同步運行，但只有在線路中所輸送的功率不超過規定極限時才能保證這個條件。如果線路的負荷增加而超過此極限值——所謂穩定極限，則兩網絡同步的並列運行將遭到破壞；在線路一端的發電機將增速旋轉，比另一端的發電機速率為快，電力輸送將變為不可能，此時調度員應立刻將線路切斷，直到他將兩網絡

---

① 汽輪發電機直接與高速汽輪機連接的發電機。

重行整步後爲止。

精確計算交流輸電線的穩定極限，是一極複雜的問題，遠遠超出了本書的篇幅範圍。但是對一般長度的線路而言，穩定極限與輸送功率 $P$ 的近似計算均可按下列簡化的公式進行：

$$P = \frac{U_1 U_2}{2\pi f L} \sin \delta. \quad (1)$$

式中  $f$ ——交流頻率； $L$ ——輸電線的電感； $U_1$  及  $U_2$ ——線路兩端的電壓； $\delta$ ——兩端電壓間的相移角。線路的功率愈大，相移角  $\delta$  就愈大。最大的功率相當於相移角等於  $90^\circ$ ，顯然此時  $\sin \delta = 1$ 。如果企圖增大線路的負荷超過此極限值，輸電的穩定即遭破壞。實際上只有當  $\delta$  值比  $90^\circ$  小得很多時，輸電線的運行才能穩定。

輸電線的電感  $L$  與長度成正比。因此在其它條件相等的情況下，輸電線愈長，則交流輸電的穩定極限就愈低。以短線路而論，其穩定極限很大，因此在選擇所輸送的功率時，通常穩定問題根本不予考慮。但如果線路長度達數百公里時，穩定就成爲決定線路最大許可負荷的決定性因素。在另一方面，線路愈長，輸電線的價值自然就愈高。根據以上所述，至爲顯然，對於數百公里長的交流輸電線路，輸電的經濟性將隨線路長度的增加而迅速下降。

輸電線的電壓愈高，其穩定極限也就愈大。因此極長的三相線路，採用超高電壓：200 000—287 000 伏，並擬過渡到 380 000 伏的電壓。但是採用這種方法，決不是沒有限制的<sup>①</sup>：當電壓升高而超過 200 000 伏時，將迅速增高線路兩端變電所內的設備費用（變壓器，特別是開關設備），同時也迅速增高線路本身的價值，主要原因是由於：在超高電壓下，必須採用較大直徑的導線以避免巨額的電量損耗（即從高電壓的導線經過空氣發散電的損耗）。在這種條件下，換用更高的電壓，在本質上並不能改變三

<sup>①</sup> 目前蘇聯莫斯科，古比雪夫水電站及斯大林格勒水電站間的輸電線已採用 400 000 伏——譯者。

相交流輸電經濟的極限距離。

另一個限制輸電距離的重要因素，藉昇高電壓的方法也是根本不能避免的。如果線路以交流運行，則充電電流無益地流過導線之間及導線與地之間的電容。這電流通過導線時，將引起熱耗，熱耗與線路長度的立方成正比。如此迅速增大的損耗，使遠距離的電力輸送根本不能應用交流；但所幸運的是：由於充電電流所造成的損耗只有在線路無負荷運行時才充分地表現出來。當線路帶有負荷，充電的功率或多或少被相反符號的無功功率所抵償，此項無功功率是當負荷電流流經線路導線的電感 $L$ 時所產生的。要全部抵償充電功率，只有當負荷的功率值達到所謂輸電線的自然功率<sup>①</sup>時才屬可能。不難證明，此項自然功率僅與線路電壓的平方成正比，而與線路的長度無關。

對於比較不長的線路（100—200公里之間），充電電流比較不大，帶有與自然功率相差遠甚的負荷而運行是完全允許的。線路愈長，則以等於自然功率或接近自然功率的負荷而運行就愈重要。對極長的線路來說，不符合這個條件將不僅引起損耗的急劇增大，而且將造成輸電線電壓調整上的極大困難。事實上極長的輸電線輸送自然功率原是不可能的，因為長距離的輸電線的穩定極限很低。通常50周波的交流線路，如果線路的長度不超過400—500公里時，才可能穩定地輸送自然功率。這個距離與線路的電壓無關，因為增高電壓，線路的自然功率與穩定極限同樣地迅速增大。縱令是這樣長的線路，也只能在儘量減小線路兩端發電機和變壓器的電感的條件下才能保證穩定的電力輸送，這樣將關係着這些電機變得很笨重而價昂。

雖然遠距離輸電線能夠以等於自然功率的負荷穩定地運行，但有關充電電流的困難還是沒有消除。實際上輸電線並非在所有時間內以滿負荷運行：在輕負荷期間，或在接通過程中等等，充電功率就不能得到補償，很長線路的電壓調整，就顯得十分困

<sup>①</sup> 參閱格拉菲諾夫著《電力網絡》上册譯本第154頁，及薩列斯基著《電力輸送學》譯本第504頁——譯者。

難。

總之，多利沃-多勃羅沃爾斯基所創擬的簡單型式的三相輸電系統之作用距離，受到經濟及技術因素的限制，而顯得相當平凡了。

如圖 2 所示，三相電流的技術早已接近了這個極限——約在多利沃-多勃羅沃爾斯基第一次試驗後的 20 年；在那 20 年後的 35 年中，輸電距離的增加比較不大。在現今已有的三相交流線路中，最長的一條線路將電能送到 480 公里遠的距離。這一距離僅表示將所有的輸送功率從線路的一端送到另一端，中間並無接用電能的重要分支點。如果沿線路分佈着大型的電力系統，並與此線路在許多中間點相連，則輸電的穩定性可以提高，輸電的極限距離亦可大大增加。

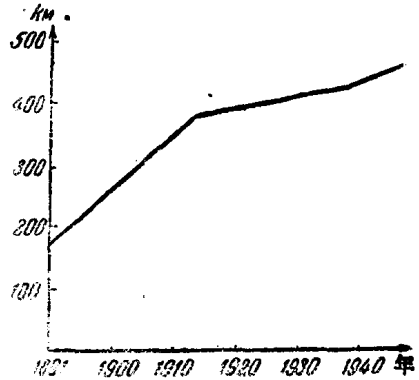


圖 2 三相輸電線路距離的增加

爲了增加三相輸電線的作用半徑，曾提出了很多的解決辦法。譬如，很早就認爲這個問題可以在下列的條件下解決：沿線路每隔 200—250 公里佈置帶有旋轉電機的變電所，藉旋轉電機來維持沿線的電壓不變。假定用這種方法，使長線路猶如分成數條相互獨立的短線路而運行，其中每一段均能在穩定的狀態下輸送足夠大的功率。但是日丹諾夫教授 (проф. П. С. Жданов) 及其他蘇聯科學家的研究指出：應用這樣的電機所得的效果比預料的要低得多，這種解決方法在經濟上是無法接受的。

也曾打算用減低公式(1)分母中的頻率  $f$  到 25 或 16 $\frac{2}{3}$  周波的方法來增大輸電的穩定極限；爲此目的，必須在線路的始端與終端裝置特殊的變頻機。另一批人的建議可歸納爲減小或補償輸電線路的電感  $L$ 。爲了減小線路的電感，有人提出將每一導線用數根截面較小相隔某些距離而懸掛的導線來代替。這個原理，特



別預計在建設使瑞典北部的水力發電廠與中部南部的各省聯系起來的380 000伏的大容量線路上採用。根據同一方法如在線路中串聯高壓電容器，若其電容能够局部補償線路的電感，則將達到更高的效果。

也會想到利用特種的電機來代替電容器。因此第三批人曾建議將容許的相移角 $\delta$ 數值增大。顯然，最後一種人的解決辦法，是根據沿預定的極長距離的線路輸送電力的特性（所謂半波傳輸）而提出的，這種辦法本書不擬加以研討。

對於以上所提出的每一種解決辦法，進行過於深入的研究是不必要的。其中有幾種方法原是根據不正確的前提，而且根本不能得到要求的效果。其它幾種在原則上是正確的，但由於過大的電能損耗或需要不能許可的高價設備而顯得不經濟。所剩下的建議（特別是用串聯電容器補償電感），在技術方面顯然可以用三相電流輸送電力到500公里以上的距離。然而採用這些辦法，仍需要價值昂貴而且局部不很可靠的附屬設備的投資費用。

所有這些建議，僅僅減輕、而不是解決遠距離交流輸電中所發生的困難，同時失去了三相電流系統主要的優越性——簡單。到目前為止，在這些解決辦法中，還沒有一種方法獲得實際上的應用，甚至也未受過較大規模的考驗。

但是由於全世界用電逐年急速增加的結果，僅靠地方的動力資源及遠方輸入的高級燃料來適應大工業區的用電需要就日益困難。因此更迫切需要利用遠區的動力資源，特別是河流的水能和不容許輸送到遠處的低熱值燃料。為此目的，電氣工作者不僅應該學會將電力輸送到數百公里，而且還要輸送到數千公里的距離。毫無疑義，這項任務遠遠超過了三相交流技術的可能限度。爲了要解決此項任務，原則上應該將現有的輸電系統用另一種系統代替，這種系統應無穩定條件及電壓調整加於輸送距離與輸送功率上的任何限制。

首先提出這樣代替的並不是別人，而正是三相電流系統的創始者多利沃-多勃羅沃爾斯基。