

77059

電力系統的 過渡歷程

蘇聯 維·阿·維尼科夫 勒·阿·茹科夫著



燃料工業出版社

電力系統的過渡歷程

蘇聯 維·阿·維尼科夫 勒·阿·茹科夫著

吳大榕譯

燃料工業出版社

內 容 提 要

本書以簡短方式引述在電力系統中進行着的過渡歷程的分析，同時也考慮到它們的電氣部分和機械部分的作用。另外，還載有某些過渡歷程的計算方法，並研討通常在計算中不予考慮的許多因素。

本書可供動力工程技術人員用作進修教材，也可供動力科學工作者和高年級專科學生、研究生的學習參考。

* * *

電力系統的過渡歷程

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

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В. А. ВЕНИКОВ Л. А. ЖУКОВ 著

吳 大 榕譯

燃料工業出版社出版

社址：北京東長安街燃料工業部

北京市書刊出版業營業證可證出字1012號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：杜全恩 校對：趙迦南

書號398電174 * 850 × 1092 $\frac{1}{2}$ 開本 * 75印張 * 201千字 * 定價一元三角九分
一九五五年四月北京第一版第一次印刷(1—3,600冊)

序 言

社會主義的生產關係，給社會生產力以充分的發展範圍。現在全蘇聯人民正積極地參加偉大的斯大林共產主義建設，這把蘇聯的動力工程提至新的更高的技術水平。

第十九次黨代表大會關於在 1951—1955 年發展蘇聯的第五個五年計劃的指令，揭示了祖國動力建設的大規模的偉大的景面，以及發展科學工作和科學與生產緊密聯系的重要作用。

祖國動力系統的功率的巨大增長，以及由於出現遠距離輸電線而引起的系統的複雜化，當工業方面對供電可靠性和電能質量的要求不斷增長時，導致了在動力系統中，在動力聯合組織中，在設計局中以及其他部門中工作着的廣大蘇聯工程師們，進一步提高專門技術修養的必要性。

過渡歷程是電力工程的最艱深的理論領域，且在現有的專門技術文獻中，談到的最少。同時過渡歷程對動力系統的運行也有極大的影響，並決定了對於主要設備的參數，以及對於電力系統的繼電保護、自動控制和調整裝置的一系列的要求，因而應當充分精密地給以分析。上述理由也就是創作本書的動機。

本書把在電力系統中進行着的電磁過程和電氣機械過程放在一起敘述，由於現在在蘇聯實現了把大水力發電廠聯結為單一系統的遠距離電力輸送，這些過程的分析獲得了更大的意義。在這些情況下，水力機械過渡歷程能在根本上影響於系統中的電氣過程。

在最近期間出現了一系列的著作，專門致力於電機中的過渡歷程的研究（M. П. 柯矢琴柯，A. A. 戈列夫，E. Я. 卡查夫斯基等等），但是研究這些著作需要相當的準備，因此對於某些讀者是有困難的。除此以外，其中敘述的材料，並不接觸到整個電力系統，而祇是它的一部分——電機。

在這一方面說來，本書是較為通俗的，但同時它並不具有那表徵所舉著作的敘述上的嚴密性；本書敘述儘可能地簡化，這樣會使初學較為簡易，並使過渡到較深著作的研究成為可能。

書中簡短地討論了在電力系統中的過渡歷程的某些理論問題，且敘述了在現有文獻中闡明得不充分的計算方法。著者並不打算描述發生於電力系統中的所有的過渡歷程，但是有意要向讀者介紹過渡電氣機械過程的最簡單的分析方法。

過渡歷程的普遍理論的研討，指出過渡到通常應用於解答個別特殊問題的簡化實用方法的可能性，如計算動態穩定，短路電流，系統中的頻率變化等等。

同時，研究也涉及了屬於機組的機械部分的運行問題，並特別考慮到調整系統的作用，這當機器轉子的旋轉速率顯著變化時是極為重要的。由此過渡到當電力系統中功率變化時的頻率變化的研究。

本書以戈列夫-派克方程式作為基礎。這些方程式在專門致力於分析過渡歷程的著作中，起着特殊的作用，最完全地闡明了電力系統的理論，且促進了各種新的線路，儀表，和設備的研究。所指出的著作就是以這些以及與他們相類似的方程式作為基礎的。但其中的大量著作都是專門研究電力系統中過渡歷程時所發生的各種特殊問題，所以直到現在，幾乎還沒有一部著作把這些問題合併起來研討，並以能使廣大讀者充分接受的形式寫出。

在本書中，著者作了對於電力系統中過渡歷程進行綜合研究的嘗試。

在進行電力系統中過渡歷程的計算時，通常不考慮同步機的飽和。但是那樣的簡化，有時可能導致嚴重的誤差，因此在書中給出飽和影響的某些估計是合適的。

鑒於當分析電力系統運行時模型化方法的逐漸增長的意義，著者涉及了當研究過渡歷程時應用模型化方法的問題。

著者認為他們自己的著作，僅只是朝向以一般方法研究過渡歷程的很為畏縮的但是必要的步伐，僅只是那種實際上仍為必

需、但方法上極為困難的綜合工作的嘗試。

祇有在將來，由於許多作家的共同工作，再加上工程師讀者們的幫助，可能會產生一種為目前所沒有的既完整而又統一的電力系統過渡歷程的一般理論。

著者希望僅祇涉及該理論要點的本書能促進上述目的的實現，雖然它所起的作用很小；也希望本書能得到讀者的同情和歡迎，雖然它是有缺點的。

同時，著者向讀者請求通知給他們所有被發覺的書中的缺點。

本書所有各章都是由二位著者共同寫成的。

寫作的領導以及最後的校訂是由維·阿·維尼科夫來擔任的。

著者認為應該指出，在本書的第五章以及其他各章的個別部分中，著者引用了並發展了曾發表於過早逝世的普·斯·日丹諾夫教授的著作中的某些研究。

列舉於附錄中的計算圖，借自參考文獻[В. А. Веников и Л. А. Солдаткина, Руководство к специальному курсовому проектированию системы передачи, лит. МЭИ, 1950]，其中大部分是在德·耶·來維脫領導下，按照維·阿·維尼科夫所建議的計算方法，由勒·普·保魯杜林所作出的。

最後著者對納·阿·曼里尼柯夫表示謝忱，他在全蘇動力函授學院科學技術部參加了手稿的討論並給以校閱。

著者

目 錄

序 言

緒 論 當研究電力系統中的過渡歷程時所發生的問題

的一般評述..... 6

B-1. 問題的提出..... 6

B-2. 電力系統中過渡歷程的評述..... 8

B-3. 計算過渡歷程的主要方法的比較評價..... 12

第一章 電力系統中過渡歷程的基本方程式..... 15

第二章 由電機所制約的過渡電磁過程的方程式..... 26

2-1. 同步機參數評述..... 26

2-2. $\alpha, \beta, 0$ 和 $d, q, 0$ 座標系統的應用..... 30

2-3. 計算過渡歷程中對稱的週期性分量..... 37

2-4. 磁性耦合迴路中的磁鏈表示式..... 44

2-5. 戈列夫-派克方程式應用於電力系統..... 48

2-6. 簡化方程式及其應用..... 63

2-7. 異步電動機的方程式..... 70

第三章 電磁和電氣機械過程方程式的聯立解答..... 72

3-1. 功率的瞬時值..... 72

3-2. 功率的簡化確定..... 77

3-3. 用分段計算法研究過渡歷程..... 81

3-4. 考慮到渦輪機的調整特性時過渡歷程的計算舉例..... 93

第四章 計算動態穩定，系統中頻率變化，及發電機

調步條件的簡化方法..... 108

4-1. 過渡歷程簡化計算方法的應用範圍..... 108

4-2. 最簡單系統的動態穩定的計算..... 109

4-3. 在當功率可比擬於兩發電廠並聯運行的情形下
動態穩定的計算..... 114

4-4. 應用典型特性來決定故障後的 δ 角的變化..... 121

4-5. 同步機擺動方程式的近似分析法..... 125

4-6. 系統中頻率變化的簡化計算.....	127
4-7. 發電機調步情況的研究.....	133
第五章 和發電機轉子的相對運動相聯系着的現象.....	142
5-1. 同步機功率方程式的展開.....	142
5-2. 同步發電機的異步功率方程式.....	147
5-3. 異步功率方程式的展開.....	158
5-4. 異步功率對於過渡歷程進行的影響.....	165
5-5. 電力系統中的異步運行情況.....	170
第六章 考慮到發電機的擺動, 計算在過渡歷程時的電流... 187	187
6-1. 問題的提出.....	187
6-2. 考慮到發電機的擺動時短路電流的簡化計算方法.....	188
6-3. 考慮到發電機的擺動時短路電流的算例.....	195
第七章 發電機飽和的影響	199
7-1. 一般概念.....	199
7-2. 過渡歷程中的飽和影響.....	203
7-3. 在複雜電力系統中考慮到飽和後的過渡歷程的計算.....	210
第八章 研究電力系統中過渡歷程時模型的應用	214
8-1. 在交流電路的靜態模型上計算過渡歷程.....	214
8-2. 在電力系統的動態模型上研究過渡歷程.....	220
附錄1. 對於渦輪機調整系統各別元件的方程式的推導 ... 221	221
П-1. 調速器套管的運動方程式.....	221
П-2. 滑閥的運動方程式.....	223
П-3. 伺服機活塞的運動方程式.....	224
附錄2. δ 角變化的典型曲線	226
附錄3. 動態穩定計算圖	231

緒 論 當研究電力系統中的過渡歷程 時所發生的問題的一般評述

B-1. 問題的提出

現代的電力系統，把一系列的不同的元件，聯結在統一的組合中。這裏面包含發電廠及其渦輪機、發電機和調整設備，輸電線和大量電動機的動力負載。

用分析方法來研究在任何過渡歷程中的電力系統的性狀是極為複雜的。這就是，依據已知的系統參數(物理特徵)和由起始情況所決定的初具條件，來測定所有的變化的數量。系統中包含着大量元件，其中產生有各種複雜的互相影響着的現象。由此，系統中的個別元件是互相聯系着的。例如，電氣過程和機械過程在系統的工作部分以及它們的調整機構中就是相互聯系着的。

因此，在一般場合，當分析電力系統的運行時，必須同時考慮到電磁過程(電功率的變化，電壓的變化以及同它相關聯的影響着發電機的激磁電流的電壓調整器的作用等等)，和電氣機械過程(旋轉轉矩，旋轉速率的變化等等)，以及渦輪機調速器中的機械過程——由於調速器的作用，自渦輪機所發出的功率可發生變化。在個別場合，例如，在高壓力水力發電廠的不穩定過程中，在管道中所發生的水動力過程的影響也可能是極重要的。

這樣，在電力系統中進行着的過渡歷程的完整理論，應當包括通常在一系列不同課程中分別研討的現象(高電壓工程，短路電流，電力系統穩定，電力系統自動化等等)。這一在歷史上被認為正常的情形，有時在一個總的過程中，使有關各該現象的相互聯系的總的提出，遇到困難。特別是，當用來研究所指現象的方法各不相同的時候。

如已指出的，當研究電力系統中的過渡歷程時，必須研究在發電機，渦輪機，渦輪機和管道的調節系統中所發生的機械的，電氣機械的，和水力機械的過程，以及在發電機，網絡，負載，電壓調整器和頻率調整器中的電磁的和電氣機械的過程。

解決這些問題的困難，部分地由於對問題的實際智識不夠充分。這裏，組織實驗的可能性是很受限制的，因為這些實驗必須在運行着的電力系統上進行，且不容許複製對系統有危險性的故障情況。描述過程進行的微分方程式的複雜性，在解決上述問題時所帶來的困難也是極大的。

表徵電力系統中過渡情況的方程式的繁複性，通常迫使我們採用大量的簡化。這樣，有時必須放棄考慮在系統中運行的每一電廠的工作，且用簡化的變換把複雜的線路合併為較簡單的情形——兩個或三個等效電廠的並聯運行。

依照研究的具體目的，必須引入進一步的簡化。例如，為了選擇電器設備和保護接地而完成的短路電流計算，通常在發電機旋轉速率不變的假定下進行，不計及電機轉子間的相互位移，而這在破壞了旋轉轉矩和反抗轉矩的平衡時，實際上是不可避免地要發生的。這樣，當計算短路電流時，通常僅只局限於考慮電磁過程，而不考慮電氣機械過程。

當計算電力系統穩定時，要考慮電磁過程，也要考慮電氣機械過程。但為簡化計通常假定任一發電機的轉子的轉速變化是如此微小，當以標么值表示時，旋轉轉矩在數字上可以作為和發出的功率相等。其實是，這些系統中的頻率被當作不變。除此以外，在那樣的計算中，電磁現象將被簡化地研討，不計及由於轉子電流的週期性分量^①以及定子電流的相應的非週期性分量^②所引起的影響。前面所陳述的複雜問題的那樣的解答，在大多數場合下，足以很好地滿足實際需要。可是，隨着電力系統線路的

① 這裏及以後，在現時最習用的術語將被採用。由於其變化時的衰減特徵，這一分量應稱為振盪分量才更為正確。

② 嚴格說來，這一分量也是振盪的，但頻率較低。

複雜化，隨着他們功率的增長，隨着遠距離電力輸送的實現，將更加頻繁地遇到一些場合，那時由習用方法所得到的特殊解答，可能顯示為不足够。把個別方法綜合起來的傾向愈加堅強，也愈加常常地遇到一些問題，其中通常不列入計算中的，但在新的情況下引入很大誤差的一些因素，顯示着重大的且有時是決定性的意義。

用分析方法研究電力系統中的過渡歷程，最後歸結到微分方程式系統的解答。每一微分方程式，描述着每一元件中過程的進行。當簡化進行步驟時，複雜系統的個別元件可能互相結合，因此具有可能性來簡化該方程式系統，減少着方程式的數目。那樣的簡化方法，再同時略去個別因素，為各種實用方法的特徵。

在本書以後各章中，將導出表徵電力系統中過渡歷程進行的普遍方程式，同時要研究從這些普遍方程式轉到特殊方程式的方法，那些特殊方程式是通常在解決實際問題時所應用的。

B-2. 電力系統中過渡歷程的評述

[電力系統]一名詞，意味着由電能的生產、分配和消費過程的連續性所聯結起來的各元件的總體。這樣，在電力系統中聯結着位於能量輸送路線中的所有元件，自原動機和發電機開始，至組成電力系統負載的電動機和其他電能接受器為止。電力系統的一般示意圖具有如圖 B-1 所示的那種形式。

列入系統中的元件可以分為三類。

屬於第一類的元件，在其本身中發生着電磁過程。那些元件為：電力輸送線，發電機，變壓器，異步發電機，電壓調整器。

在第二類中可以列入電氣機械過程發生於其中的元件。電氣機械過程的呈現，是由於定子磁場和對它有相對位移的轉子磁場間的相互作用。同步發電機和異步電動機便是這樣的。

第三類元件表徵着機械過程。隸屬於這一類的有渦輪機調速器，以及調節能量的原始攜帶者——蒸汽或水——的進入的機構。這些過程，一方面和發電機中的電氣機械過程緊密聯系着，

而另一方面，又和原動機以及管道中所發生的現象緊密聯系着。

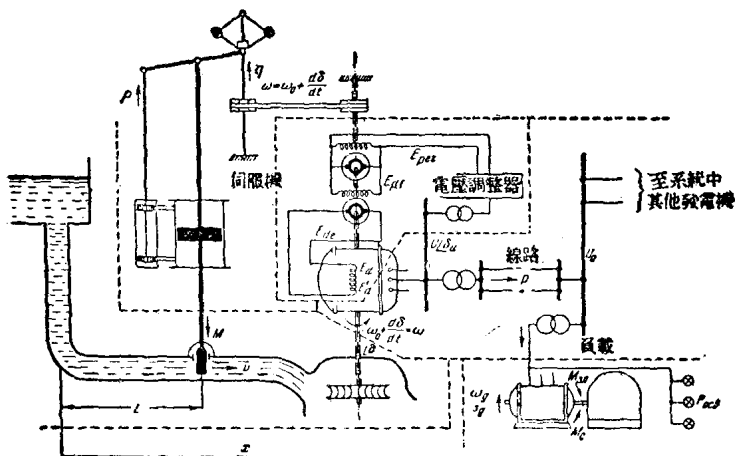


圖 B-1 電力系統的簡要示意圖

最後一類現象的分析，通常超出了有關電力系統問題的範圍。但是有的時候，特別是在具有延伸管道的水力發電廠的場合，在系統的電氣部分中的以及在那些管道中的過程必須一起考慮（例如，當水力發電機負載變化時水力撞擊的研究等等）。

可是，無論如何也不應從前面所說的得出結論，說是當計算電力系統中所發生的過渡歷程時，應當經常考慮到全部的複雜現象。工程師的實踐有規律地把過程區分為不同的組別，它們在一定條件下可能被單獨地研究。當解決個別問題時，那樣的途徑大大地便易分析，但祇有在起始條件數值的一定間隔以內，才能保證正確的結果。

下文將引述電力系統中過渡歷程進行的某些一般性狀。

電磁性質的波動過程，通常在過電壓課程中所研究的，基本上超出本書範圍以外。可是，遠距離電力輸送的出現，使這一類問題，接近於在電力系統過渡情況理論中所研究的問題。如，包含有引伸線路的系統的短路，在終端跨接着電抗器的空載線路的接入等等，必須用考慮到波動過程的方法來研究。而且在起始階段，過渡歷程的進行，正是由線路中的波動現象所決定的，以後

它便主要地依着發電機的特性而轉移。

線路中的波動電磁過程，通常表示為入射波和反射波的配合，實際上對電氣機械現象，並不發生影響。電氣機械現象是和系統中具有慣性的可動元件的位移相聯系着的。對過渡歷程的該一起始階段進行分析時，可以僅只考慮電流和電壓的瞬時值。

電力系統參數的變化，例如由短路所引起的變化，將導致該電力系統中各發電機間的有效功率和反抗功率的再分配。在系統運行情況擾動的瞬間，發電機轉子的旋轉速率，由於它們的慣性，保持不變，而功率則按照線路中已改變了的輸入阻抗和轉移阻抗，以及發電機的電動勢來分配。

要是假定了，當發電機轉子在恒定旋轉速率之下，系統中所有發電機的激磁電流和電樞反應繼續發生變化，那麼過程將相當於用來計算短路電流時的情況。這時，發電機轉子旋轉速率的變化，以及它們的原動機調速器的作用，不被計入；但是反應於發電機端點的電壓偏開或電壓變化率的激磁調整器的作用，則被計入。

可是，實際上系統中功率平衡的變化，將導致系統中每一發電機的轉子旋轉速率 v 的或多或少的變化。每一發電機的轉子的相對位置，也被相應地改變：

$$\delta \equiv \int v dt, \quad (B-1)$$

而

$$v = \frac{d\delta}{dt} \equiv \sqrt{\int \frac{\Delta M_{\text{max}}}{M} d\delta} \quad (B-2)$$

式中 ΔM_{max} ——在所研討的發電機機軸上的旋轉過剩轉矩；

M ——慣性常數。

由於發電機轉子間的相對位移，過渡歷程的以後階段表徵為發電機間有效功率和反抗功率的繼續再分配。現在這種再分配已經不僅按照電動勢的數值進行，而且也與發電機轉子的旋轉速率改變有關。當自同步速率足夠顯著地偏開時，異步功率也將出現。

此後，當短路扳斷時，或當它長期存在時，過渡歷程的發展或者導致個別機組的急劇速率變化而使它們自同步運行脫出，或者導致系統頻率的變化；這種變化的來到，是由於渦輪機所發出的功率和發電機所輸出的功率間，呈現着不平衡的結果。在後一場合，渦輪機的機械調速器進入動作，且按照發電機旋轉速率的變化來改變水或蒸汽的進量。

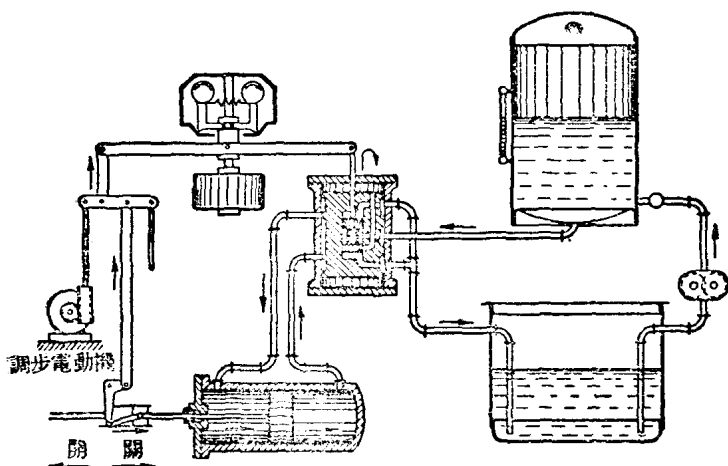


圖 B-2 水輪機調整的簡要示意圖

因為渦輪機的調速機構中存在着機械慣性(圖 B-2)，它們的作用通常僅在當系統的正常運行擾動後0.3—0.4秒才開始發生。由於渦輪機功率變化的結果，在系統中進行着有效功率的新的再分配——已與渦輪機調速器的靜態特性相適應。

假如頻率調整器(副調整器)，對於頻率的變化發生反應，那麼過程進入新的階段，按照所採用的調整頻率的方法(按照靜態或非靜態特性)，在系統機組間具有有效功率的新的再分配。此後在系統中頻率恢復至原來的正常值，或者達到決定於頻率調整設備的某一等效呆滯性的某一新的量值。

應當着重說明，所舉過渡歷程階段的劃分，是有條件的，是爲了使發生在電力系統中的現象容易表達而引用的。按照同時出現的一系列的作用因素，所有各該過程階段在實際上是同時進行

的。可是，在過渡歷程的不同時間，所有不同的因素，以較大或較小的程度顯示出來。這也使在個別的階段，進行過程的某些劃分，有了根據。

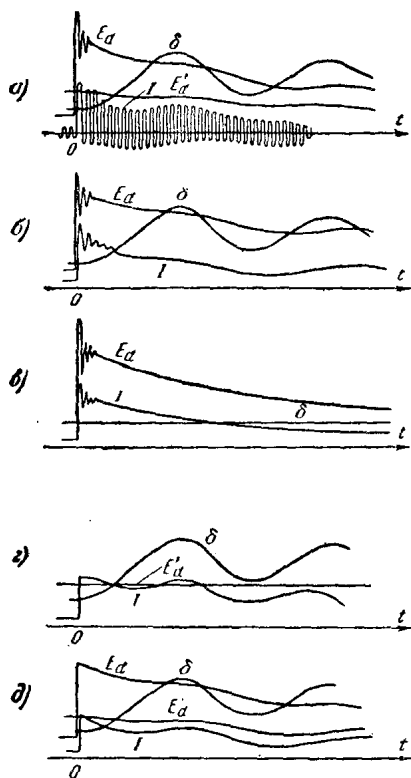


圖 B-3 用不同方法研究過渡歷程的結果的比較

a—過渡歷程的波形圖；b—按照戈列夫-派克方程式計算；c—按照戈列夫-派克方程式當 $\delta = \text{常數}$ 時計算；d—當 $E'_d = \text{常數}$ 時計算；e—當 $E_d = f(t, \delta)$ 且不考慮定子電流的非週期性分量時計算。

B-3. 計算過渡歷程的

主要方法的比較評價

過渡歷程實際計算的完成，可以應用不同的假設，且相應地具有不同程度的準確性。依據戈列夫-派克方程式而得的方法，應該認作是反映實際過程最完全的，因而也是最準確的。這時，變數表示在和轉子緊密聯系着的且和它一同旋轉的座標系統中。可以象徵地說明，在那樣的考慮下，觀察者是位於轉子上的，且感覺到定子電流或電壓的週期性分量(正弦分量)好像是恒定的量值，而相反的，定子電流和電壓的非週期性分量好像是週期性變化的量值。借助於戈列夫-派克運算方程式的計算，容許着考慮到最多數的影響因素。

在圖B-3, a中，表示着當它的穩定情況受到某種擾動時在電力系統中進行着的過程的波形圖：列示了對時間變化的曲線①：系統中發電機之一的定子電

① 此後應用的符號，係在本國專業文獻中，較其他更常遇到的。

流 I ，正比於該發電機的轉子電流的同步電動勢 E_d ，以及最後是，暫態電動勢的正軸線分量 E'_d ，它正比於穿鏈所研討的發電機的激磁繞組的磁通。在同一圖中，也表示出表徵着發電機的擺動的 δ 角的變化^①。

從波形圖可見，電動勢 E_d 的變化曲線，或是與此相同的，激磁電流的變化曲線，具有衰減的特徵。如所周知，這是和由於情況突然變化而在轉子中感應的自由電流的衰減相聯系着的。發電機的擺動，引起在轉子繞組中附加自由電流的出現。在過渡情況的起始時期，衰減得很快的非週期性分量加到定子電流的週期性分量上面去。定子的交變電流同樣地具有衰減的特性，而且，除此以外，由於轉子的擺動而略為變化。它的起始衝入，既由週期性分量，也由非週期性分量決定。

在圖 B-3, δ 中，列示了依據戈列夫-派克方程式而完成的過渡歷程的計算結果。

在圖 B-3, a 中所表示的電流的週期性函數，相當於在圖 B-3, δ 中所表示的平滑函數。這是由於前面所提到的選擇座標系統的特點所引起的。圖 B-3, a 中的曲線與圖 B-3, δ 中的曲線的區別，是由於當作分析計算時，沒有考慮到機器中鐵的飽和而引起的。

應用於計算短路電流的方法，通常不考慮發電機轉子旋轉速率的變化(擺動的影響)。在那一場合獲得的解答，如圖 B-3, ϵ 那樣。在短路電流的實用計算中，通常局限於應用數字的係數來決定電流的特徵數值。

據以計算動態穩定的簡化方法，常常引入假設 $E'_d = \text{常數}$ 或 $E' = \text{常數}$ 。假如應用這些方法於過渡歷程的計算，那麼電流和其他變數的變化特性，可能與實際情況有很大的差別。一定的近似，僅將發生於擺動的第一週的極限以內(圖 B-3, ϵ)。

爲了應用於動態穩定的計算，發展了計算電磁過程的較為複

^① 在系統中運行的發電機轉子的正軸線間的角，由 δ 來表示。在該場合，假設有二個發電廠並聯運行。

雜的方法。祇有根據那些方法，才可使計算所得的結果，和實際過程比較接近地符合(圖 B-3, θ)。這些方法不計入定子電流的非週期性分量以及與他相聯系的轉子電流的週期性分量。那樣的假設通常並不扭變轉子間相對運動的性質，但是，如從圖 B-3, θ 所見，改變了在過渡歷程開始階段時的電流和電壓的量值。

由於放棄了計算所指出的分量，在最後的計算結果中，如同計算當 $E'_d = \text{常數}$ 時的情形一樣，獲得了電機線路中電流的有條件的瞬時變化。同樣地，起始電流的量值也有些扭變。

用於實際計算的各種不同的分析表示式間的關係，將在本書以後各章中給以分析研究。