

電力系統自動化

下 冊

清華大學發電廠輸配電教研組編譯

高等教育出版社

高等學校交流講義說明

高等學校交流講義，是各校比較成熟的自編講義，主要在供教學參考，以提高講課、實驗和實習的質量。它的出版過程，是各校向高等教育部推薦編寫得較好的講義，交有關出版社出版，新華書店內部發行的。交流講義的內容，因限於編者的水平和出版社的編輯力量，可能還存在某些缺點或錯誤。爲了進一步提高講義的質量，從而遴選其中比較優秀的作爲試用教科書或教學參考書出版，歡迎使用講義的學校和讀者多多提出補充修正的意見（按講義內讀者意見表填寫），直接寄給出版社，以備修訂時參考。

中華人民共和國高等教育部

這份講義是根據蘇聯專家 С. Н. 巴然諾夫(Бажанов)在清華大學向該校發電教研組教師及研究生講授該課時的手稿,由該校發電教研組譯成中文付印。

本書適合於作為發電專業繼電保護自動化專門化的“電力系統自動化”專門課的教材。

下冊目錄

緒論	5
第一章 按頻率的動力系統自動事故減載	7
第二章 輸電線自動重合閘的補充問題	35
第三章 電力系統中的自動調節	48
第四章 ВЭИ (全蘇電工學院) 的電子離子型調壓器	63
第五章 磁性濾波型頻率調節器	76
第六章 自動調節原理的基本概念	85
第七章 自動調節系統各元件的方程式的列法	97
第八章 自動調節系統各元件方程式的經典形式和運算形式	114
第九章 自動調節系統敞開回路與閉合回路的方程式	136
第十章 直線性自動調節系統的穩定性	146
第十一章 關於調節過程的質量的介紹	164
第十二章 自動調節原理補充問題	168

結 論

電力系統自動化專門課是我在上一學期給研究生和教師同志們開的普通課的後續課程。

在這一專門課內一開始就將討論到動力系統內按頻率的自動事故減載和輸電線自動重合閘的補充問題，專門課的其餘部分將用來敘述電力系統內自動調節的問題，在現代技術水平的條件下，自動調節在各種生產過程自動化方面具有特殊重大的意義，這一點對於發電或配電都是百分之百地重要的。自動調節不僅僅是電力系統自動化中極其重要的一部分，而且也是最複雜的一部分，因此在講專門課時，我們的基本注意力將放在自動調節的問題上。

爲補充我們在普通課程內講到的自動電壓調節器及自動頻率調節器的電路及構造，我們在專門課程裏還要講一個調壓器和一個調頻器。但在討論電力系統內的自動調節問題時，專門課裏的重點將不是調整器的個別電路圖和構造而是敘述自動調節理論的原理——敘述迅速發展着的自動調節技術的理論基礎。

在普通課裏，由於講課時數較少而受到限制，只講了每一個電力工程師在電力系統自動化方面所最必需的一些知識。在專門課裏將要就電力系統自動化普通課的以下幾章加以補充和發揮，即輸電線的自動重合閘，電壓的自動調整及頻率的自動調整。對於也聽普通課也聽專門課的同志們來說，最合理的是能學一個包括這兩門課程全部材料的統一而完整的電力系統自動化課程。這樣能使教材的內容和敘述的次序得到改進。但是教研組不可能爲坐

在這裏的同志們只開出一個完整的電力系統自動化課程。因為對於那些不屬於自動化和繼電保護專業的聽衆們必須要開一個普通課，因此如果同時要和這個課平行地再開一個統一的內容上擴充了的課程，在實際上是是不可能的。

由於專門課分量的限制，本來希望講到的自動調節原理方面的某些問題將不包括在專門課內。這些問題我將在這一學年（1954—55年）春季始業的那一學期的講課裏分別地加以敘述。

還須提一下的是：在擬訂這門電力系統自動化專門課的講課計劃時，還考慮到把敘述教材時的一般的教學法上的要求和下面這個教材安排上的要求結合起來：即，要使現在在對四年制學生開的同名字的專門課裏也有可能來利用這個專門課裏的某些章節。

C. H. 巴然諾夫

第一章 按頻率的動力系統 自動事故減載

在正常的穩定的動力系統工作情況下，頻率 f 是不變的，而且等於額定值 f_n ：

$$f = f_n = \text{常數}。$$

這時，每一渦輪機所發生的功率（除去機組內的損耗）等於發電機的電功率。

如果用 P_m 代表動力系統內所有渦輪機所發生的功率的總和（不計入機組內的損耗），而用 P_e 表示所有發電機電功率的總和，則在穩定情況下

$$P_m = P_e。$$

這種在動力系統的正常工作情況下所存在的功率間的平衡有時可能會遭到破壞，例如，在用戶突然投入或者突然斷開的情況下或當系統內有一部份發電機因事故而退出工作時。現在讓我們來看一下系統內有一台或者幾台發電機突然斷開的情況，在斷開前，這些被斷開的發電機所帶的總的有功負載為 P_{omk} 我們將認為：在發電機斷開以後的初期，總的動力系統有功負載不變，並仍舊等於 P_e ，現在這個有功負載就只能由留下繼續工作的發電機來擔負了，於是，所有發電機の有功功率就往上增長。由留下繼續工作的機組的渦輪機所發生的功率在發電機斷開以後的初期也是不變的，並將等於渦輪機在原先穩定情況下所發生的功率，因為汽輪機的汽閥，水輪機的節水閘門的位置以及所有渦輪機的轉速在開始時都仍舊和發電機斷開以前一樣。因此，在電力系統中工作的機

組的渦輪機所發生的總功率就減少了 P_{omk} 。

就這樣，在系統內的一部分發電機突然斷開以後功率間的平衡就破壞了。如用 P'_m 和 P'_z 分別代表在這種情況下系統內所有渦輪機和發電機的功率，則：

$$P'_m = P_m - P_{omk} < P'_z = P_z。$$

因此，從系統內有幾台發電機斷開的那一瞬間開始，機組的轉速就開始慢下來了，這將使渦輪機的調速器動作起來，在採用自動調頻的系統內也將使調頻器動作起來。結果就將使進到渦輪機裏去的動力元素的數量增加而把系統內的轉動後備動用進來了。

如果系統的備用容量 P_{pes} 是很大的，足夠補償失去了的功率 P_{omk} ，則在備用容量動用進來以後功率間的平衡又恢復了。同時機組的轉速以及頻率又回到原先的額定值（在無差調節的情況下）或達到與額定值相近的數值（在有差調節的情況下）。

現在讓我們看一下下面這種情況：即 $P_{pes} < P_{omk}$ ，這時，如果用 P''_m 和 P''_z 分別表示在備用容量動用以後繼續在系統內工作的渦輪機和發電機的總功率，則我們可得：

$$P''_m = P_m - \Delta P_\partial < P''_z = P_z，$$

式中

$$\Delta P_\partial = P_{omk} - P_{pes}$$

為系統內的功率缺額。儘管全部轉動後備都已經動用了，功率間的平衡繼續保持着破壞的狀態，因此頻率的下降不會停止而且會繼續下去。

如果所用的電功率是不隨頻率變化而始終是一個常數，則系統內只要一形成功率的缺額就會在最後把頻率降低到零。但在實際上當頻率降低時，系統內電能的消耗量是要減少的。所以頻率不會降低到零，而只降低到某一個新的穩定值。在這個數值上，系統功率的缺額 ΔP_∂ 將會由於所用電功率降低而補償過來。如果用 ΔP_z 表示系統內由於頻率降低而在總的電力負載上減少的數

量,則

$$\Delta P_e = \Delta P_d,$$

就是說,在新的穩定情況下,系統內電能消耗的減少應等於功率的缺額。

有功功率隨頻率而變的這種關係是各個個別用戶以及整個電力系統極重要的特性。

有些用戶的有功功率是不隨頻率而變的(在電壓不變的條件下),屬於這一類用戶的有各種電爐、電氣照明、電解槽以及某些其他用戶。

第二組用戶的特點是:他們的負載與頻率成正比。屬於這一類的有下面這樣一些電動機:這些電動機所拖動的機械有着不變的加在軸上的力矩,例如,金屬加工車床上用的電動機,以及球型粉煤機、豎井型粉煤機、捲揚機、傳送器等機器上面所用的電動機。

最後:屬於第三組電力用戶的是當頻率變化時,有功功率要比以上一組的用戶變化得更多的用戶,其中有的用戶的負載是差不多與頻率的二次方成正比的,有的與三次方、甚至於更高的方次成正比,屬於第三組的用戶是那些軸上轉矩隨頻率而變的機械上所用的電動機,例如:通風機和水泵上的電動機。

上述三組中第一組用戶的有功功率在頻率變化時是不變動的。至於負載與頻率成正比而變的第二組用戶,在頻率變化百分之一時,有功功率也相應地變化百分之一。至於最後一組用戶,他們的負載是和頻率的二次方,或更高的方次成正比的。因此當頻率每變化1%時,有功功率相應的變化將大於1%。例如,如果某一用戶的負載是和頻率的立方(三次方)成正比的,則當頻率在不大的範圍內變化時,頻率每1%的變動將使負載變動3%;如果負載是和頻率的四次方成正比的,則相當於每1%頻率上的變化將

有 4% 有功功率的變化,其他依此類推。

一個電力系統的負載是包括着具有各種功率-頻率關係的用戶的。在討論按頻率自動事故減載的問題時,我們所關心的頻率範圍將是在 50~45 赫茲的範圍內。這範圍內的電力系統的有功負載和頻率的關係實際上是直線性的,對各個分別的用戶來說,這類關係也如此。

有功功率在頻率變化時也同時改變的這種性質叫做負載的調節效應。定量地這個效應是用叫做負載調節效應係數 K 來表示的,他是有功負載百分變化值和相應的頻率百分變化值的比值

$$K = \frac{\Delta P \%}{\Delta f \%}。$$

根據蘇聯已有的實驗數據,對於大多數動力系統這個負載調節效應係數在 $K=1$ 至 3 的範圍之內,同時因為電力系統負載的成分不是一成不變的,所以在每一電力系統內可以看到係數 K 的數值會在 $\pm(10\sim15)\%$ 的範圍內變化。

負載調節效應係數的數值可用近似計算法決定,也可以用實驗方法加以決定。

系統內發生功率缺額以後穩定下來的頻率很容易就可以由簡單的計算把它算出來,只須知道係數 K 的數值。讓我們把下面這個例子來算一下。

在某一穩定情況下的系統負載假定為 100%。由於發生了事故斷開了幾台發電機,這些發電機在事故發生前所帶的負載為系統內全部發電機負載的 14.5%。繼續在系統中工作的機組的轉動後備為 10%。在事故發生前系統是在額定頻率下工作着的,即 $f=f_n=50$ 赫茲,負載調節效應係數等於 1.5。我們要問問:在發電容量的事故斷開以後系統將在什麼頻率下穩定下來呢?

解：

$$P_{omk} \% = 14.5 \% ; P_{pes} \% = 10 \% ; K = 1.5 .$$

$$\text{功率缺額 } \Delta P_0 \% = 14.5 - 10 \% = 4.5 \% .$$

因為要過渡到具有較低頻率的新的穩定情況去，系統負載應下降 $\Delta P \% = \Delta P_0 \% = 4.5 \%$ 。

$$\text{頻率的下降 } \Delta f \% = \frac{\Delta P \%}{K} = \frac{4.5}{1.5} = 3 \%$$

$$\text{如用赫茲作單位 } \Delta f = 50 \times \frac{3}{100} = 1.5 \text{ 赫茲} .$$

系統頻率由 50 赫茲降到新的穩定值 $50 - 1.5 = 48.5$ 赫茲。

在功率間的平衡遭到破壞時，系統頻率向新的穩定值的轉變是一個在某一時間內的瞬變過程。如果渦輪機的氣閥和節水閘門的位置在這整個過程中不變（例如，在一個沒有轉動後備的系統內突然斷開發電容量以後），研究工作證明：電力系統的頻率是按指數規律而變化的：

$$f = f_0 - \Delta f (1 - e^{-\frac{t}{T}}) .$$

在上式中 f_0 表示功率平衡破壞以前系統內的頻率； Δf 表示瞬變過程中頻率的全部變化（採取頻率降低時的數值為正，上升時為負）； T 表示頻率變化過程的時間常數。時間 t 由功率平衡突然遭到破壞時算起。一定動力系統內的時間常數 T 的數值，是會隨着投入系統的負載和發電容量的改變而變動的，經驗指出：在動力系統的頻率下降時，時間常數通常是在 4~10 秒的範圍內。

動力系統的頻率降低會導致很嚴重的後果，首先，頻率的降低就意味着供給用戶的電能的質量變壞，同時可能使用電企業的工作遭到危害。

更重要的是需要指出頻率降低對於動力系統的工作所可能帶來後果，數值不大的頻率下降可以使發電廠廠用機械的生產率大

大降低：譬如說，對於給水泵、凝結水泵、排氣機、通風機等等。當頻率只降低到 48~47 赫茲時，廠用機械的正常工作就會發生很顯著的破壞了。

頻率的降低可以使渦輪發電機的轉輪發生故障。

頻率降低時，發電機、勵磁機以及輔助勵磁機的轉速也相應地降低，這將使系統的電壓降低。當頻率低於 46~45 赫茲時，自動調節勵磁裝置一般地已經不能保證把電壓維持在額定值了，因此，甚至於在 45 赫茲時就會發生電力系統工作穩定性的破壞。曾經有過這樣一些事故：儘管系統內所有的發電機都裝有合適的自動調節勵磁裝置，但頻率的降低仍然使系統發生電壓的雪崩。

因此，系統頻率的事故降低可以進一步發展成為對系統具有極大危害性的事故。這一類的事故通常都是由系統內有一台或者幾台發電機斷開而開始的。由於這種原因，頻率就降低了。隨着電廠廠用電機械的生產力降低，電力系統的電壓也降低，這將使渦輪機所產生的功率減少，和頻率進一步的降低。而在另一方面，則將造成電壓的雪崩和各電廠間並聯運行的破壞。最後這一類事故將使系統全部崩潰：大部分用戶停電，其中也包括最重要的用戶。

根據蘇聯所採用的電廠電網技術運行規程 (ПТЭ)^①，當系統頻率降到低於 49.5 赫茲，而在具有記錄型的頻率計時低於 49.8 赫茲的情況下，值班調度員應該立刻採取各種辦法恢復頻率的正常值，首先就是要動用現存的後備容量。

但是在突然出現大量功率缺額的情況下，值班調度員以及電廠變電所的運轉人員所能採取的投入後備容量、限制及斷開用戶等操作，對於防止由於頻率降低而發生的事故擴大來說是不夠有效的。在這種情況下唯一的、可靠的而且又有效的措施就是自動

① Правила Технической Эксплуатации.

地斷開一些用戶，這將使頻率暫時停止下降並且很快地把它恢復到相當接近於額定值的數值。

這種措施就叫做按頻率的系統自動事故減載 (AAPЧ)，因為用來實現自動減載的裝置是在頻率降低時動作的。這個措施是在 1939 年由蘇聯的哥倫希坦茵 (В. М. Горинштейн) 提出來的，以後 AAPЧ 裝置即被研究出來並被採用到動力系統裏去。

在防止系統事故擴大所採用的措施方面，過去也曾有人建議根據電壓來實現自動事故減載，也就是：當電壓降低時自動地斷開部分負載。蘇聯的科學家和工程師們指出了這種措施的不合理性。他們的根據是：像自動斷開用戶的這種極端的辦法只有在系統內出現有功功率缺額以及因缺額而發生的頻率降低時才有必要。至於系統電壓的降低，則在系統具有足夠的有功發電容量時也是會發生的。在這種電壓降低的情況下，頻率是不會降低的。而且這時用來防止系統穩定性可能遭到破壞的，有效而且足夠的措施就是大家都已經知道的自動強行勵磁。

過去曾研究出根據二種不同的原理來實現 AAPЧ 的自動裝置，那就是：反映頻率瞬時值的自動裝置，及反映頻率下降速度的自動裝置。反映系統頻率下降速度的裝置暫且在實際中還沒有廣泛地運用。但是這種裝置比反映頻率瞬時值的裝置有着原理上的優點，因為他們可以在系統頻率還沒大大降低時就實現自動減載。要利用反映頻率改變速度的裝置來實現自動事故減載還需要克服某些困難，但是在進行進一步的研究和設計以後，這一類型的 AAPЧ 裝置將會在電力系統內獲得廣泛的運用，那是完全可能的。同時，在將來也可能運用既反映頻率瞬時變化又反應變化速度的混合式 AAPЧ 裝置。

在本課程內，我們將只討論已獲得廣泛運用並由豐富的運行經驗檢驗過的反映頻率瞬時值的 AAPЧ 裝置。

對 AAPU 裝置的基本要求及實現 AAPU 的基本原則

1. 被 AAPU 裝置斷開的用戶的功率應決定於引起頻率降低的系統功率的缺額。

在一個動力系統內可以發生不同數值的功率缺額。爲了要避免過多的斷開，同時又要保證在任何可能的功率缺額下頻率能恢復到所要求的數值，AAPU 裝置在少量的功率缺額時應該只跳開較少的負載；例如：系統功率的 3~4%，而在大量功率缺額的情況下，就應斷開較大量的負載，可達 30~50% 或更多。

爲了能滿足這個要求，AAPU 是用挨次輪跳的方法來實現的，可將被 AAPU 裝置斷開的用戶分成幾個組（輪），把不重要的用戶歸爲第一輪，較重要的歸爲第二輪……等等，依此類推。AAPU 的輪數通常可達 5 個至 7 個（其中不算將在以後講到的一個特殊輪）。在功率缺額最小，但已經需要系統自動事故減載時，第一輪 AAPU 裝置即啓動而把相應的一組用戶斷開。當功率缺額較大時除了第一輪以外還將斷開第二輪用戶……等等。在最嚴重的故障情況下，減載的所有各輪的 AAPU 裝置都啓動，而把 AAPU 作用所及的用戶全部跳開。

2. 每一個後一輪的用戶只有在前一輪的用戶斷開後還不能避免頻率降低到不可容許的程度時才應該被斷開。

如果不遵守這個條件，就會多餘地斷開屬於下一輪的用戶，這一要求是對繼電保護所提的有選擇地動作的要求是相似的。

在原則上，可用以下三種調整 AAPU 裝置的方式來進行爲滿足這一要求所必需的各輪的整定：根據不同的頻率（頻率整定法）；利用不同的時限（時間整定法）；及根據頻率又根據時間的混合整定法。

實際上只根據時間來整定 AAPU 各輪的方法是完全不能採用

的，因為對於減載的最後幾輪就要求應用很大的時限，因此就要造成用戶斷開的延遲及事故的擴大。而運用頻率及時間混合整定法的可能性也因受種種條件的限制而只在很少的情況下才採用。

一般在動力系統內採用的都是根據頻率來整定 AAPI 各輪的方法^①。第一輪事故減載的自動裝置配備着具有最高啟動頻率的頻率繼電器。每個後一輪的啟動頻率選擇得要比前一輪的低。如果在第一輪自動裝置動作以後及第一輪的用戶斷開以後，系統頻率不再下降到 AAPI 第二輪的啟動頻率，則該系統的事故減載就在這裏停下來了。如果頻率繼續下降並達到 AAPI 第二輪的啟動頻率，則第二組用戶將被斷開。如果此後頻率繼續下降並達到第三輪的啟動頻率，則第三輪的自動裝置將動作，其餘依此類推。

用 f_1 表示 AAPI 第一輪的啟動頻率，在運用頻率整定法時以 f_2 表示第二輪的； f_i 表示某個第 i 輪的啟動頻率；而用 f_n 表示最後一輪即第 n 輪的啟動頻率（腳註字母 n 表示 AAPI 所有的輪數）。前面已經指出過，任何時候都應該是 $f_1 > f_2 > \dots > f_n$ 。AAPI 的前一輪和後一輪啟動頻率之間的差數叫做 AAPI 的選擇性級差，用 $\Delta f_{\text{сел}}$ 來代表它，則可有

$$\Delta f_{\text{сел}} = f_i - f_{i+1}。$$

如果滿足 AAPI 各輪順序動作的要求，選擇性級差應該足夠大。

現在讓我們來決定一下 AAPI 相隣二輪——即第 i 輪和 $i+1$ 輪——間選擇性級差的最小數值 $\Delta f_{\text{сел мин}}$ （參看圖 1）。

假定 AAPI 裝置內所用頻率繼電器的誤差不超出 $\pm \Delta f_{\text{ногр}}$ 的範圍，現在我們來討論一個對 AAPI 裝置的正確工作最最嚴重的情況；即前一 i 輪的頻率繼電器具有最大的負誤差它在頻率

^① 現在獲得廣泛運用的是這樣一種 AAPI 系統：其中除了根據頻率而整定的各輪以外，還有一個根據時間整定的所謂的特殊輪。

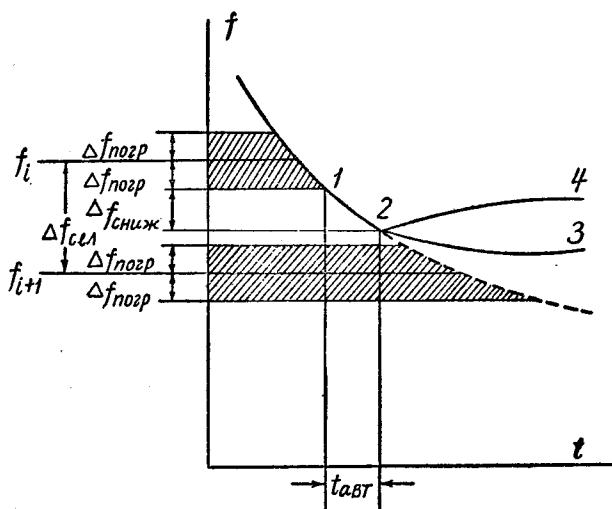


圖 1

$f_i - \Delta f_{\text{нозр}}$ 時動作，而後 $i+1$ 輪的頻率繼電器有着最大的正誤差，並在頻率 $f_{i+1} + \Delta f_{\text{нозр}}$ 時動作。

圖 1 所畫曲線即系統中在 AAPЧ 動作時，頻率變化的曲線。在頻率為 $f = f_i - \Delta f_{\text{нозр}}$ 時第 i 輪 AAPЧ 裝置的頻率繼電器即啓動（點 1）。經過了某一個對於 AAPЧ 裝置的中間繼電器及斷路器動作時所需的時間 $t_{\text{асм}}$ 以後，自動減載第 i 輪的用戶即斷開（點 2）。

從這一瞬間開始，頻率將按新的規律變化。如果在斷路器斷開以後，繼續在系統中工作的所有發電機送入電網的功率 P_i 仍舊大於所有渦輪機所發生的功率 P_m ，則系統頻率將繼續下降（曲線 2—3）如果 AAPЧ 第 i 輪的用戶斷開以後功率 P_i 變得小於 P_m ，則頻率將停止下降，系統頻率開始上升，趨向於新的穩定值，在這一數值下重新出現功率 P_m 和 P_i 之間的平衡（曲線 2—4）。

AAPЧ 第 i 輪和第 $(i+1)$ 輪動作上能保證正確順序的條件是： $(i+1)$ 輪 AAPЧ 裝置的頻率繼電器不應在 AAPЧ i 輪用戶的