

淺談低頻卸載

供電處電驛標置組 黃彥嬰

一、前言

低頻卸載 (Underfrequency Load Shedding) 是指電力系統的運轉頻率如因故低於最低連續安全運轉頻率(59.5Hz)時，考量到供電品質及系統安全，須自系統中卸除適量之負載，進而拉升系統運轉頻率；若任由系統運轉頻率長期低於最低連續安全運轉頻率，可能對發電機組及其它機電設備造成損害，甚至導致系統崩潰。

低頻卸載可以透過頻率電驛來實現，不同於一般的保護電驛是以『被保護之設備發生故障』作為動作初始條件，頻率電驛是以『系統運轉頻率』為基礎，一旦系統運轉頻率低於頻率電驛預設的始動值且滿足跳脫邏輯，即輸出跳脫訊號將負載切離系統，確保系統安全；反之，如果用電端的負載大量跳脫，則會令系統運轉頻率上升，此時亦可透過頻率電驛的設定，將部分發電機組切離系統，降低系統的發電量以防止輸電線路過載。

傳統的電磁式頻率電驛因受限於僅單一功能且維護不易，目前已逐漸被多功能數位式電驛中的頻率保護功能取代；吾人嘗試以低頻卸載之相關規劃為出發點，說明規劃流程及注意事項，接著針對低頻卸載原理、頻率保護邏輯與特性測試逐一說明，最後藉由實際模擬加以驗證。

二、低頻卸載相關規劃

欲進行低頻卸載之規劃時，需先獲得相關系統參數，包括：系統尖峰負載、系統頻率與功率因數、H 慣性常數、系統運轉情形、負載綜合頻率係數、大型火力及

核電廠機組跳機或主要傳輸線路解聯時，各區域間之最大電力傳送量等，再依據電力系統低頻卸載規劃原則(如表一所示)，逐步規畫各區域所需卸載之對象、卸載總段數、每段卸載量等，以下為低頻卸載規劃時需注意之事項。

表一. 電力系統低頻卸載規劃原則

1	以地區電力供需平衡為考慮重點。
2	系統運轉頻率均能於低頻卸載動作完成後回復至 59.5Hz 以上 60Hz 以下。
3	若低頻卸載對象含有抽蓄機組，則於深夜抽水時段優先卸除抽蓄機組，以減少對一般用戶之停電機率，其低頻設定高於一般用戶。
4	為提升卸載效果，低頻卸載優先以跳脫整組配電級變壓器負載為原則，包括一次變電所、配電變電所、二次變電所及特高壓用戶變電所。惟饋線已裝設具有低頻卸載功能之智慧型電子裝置(IED)時，得以饋線為卸載對象。

低頻卸載對象之優先次序：原則上先考慮卸除郊區、一般住宅區及商業區之負載，之後為高科技園區、加工出口區等負載，對於其它重要負載如：醫院、警察局、消防局、國防安全用電、各級重要行政機關等，則避免列為低頻卸載之對象，若排除上述重要負載後會有低頻卸載量不足之情況產生，可建議將重要負載移至始動頻率較低之段數，以降低動作機率，避免重要負載因停電而引發諸多爭議。

低頻卸載量之預估：當系統過載量越大時，所需卸除之負載量當然也就要越多，因此在規劃低頻卸載量時，必須先預估系統最大過載量，然而如何預估系統最

大過載量並無一定的標準步驟可依循，一般而言係以總負載量之 30%~50 作為系統最大預估過載量。

段數間之頻率差距：當系統運轉頻率降至頻率保護所預設的始動值以下時，電驛從內部邏輯判斷至輸出跳脫訊號，最後將斷路器啟斷，共需花費約 200 毫秒，在此時間內，系統運轉頻率仍不斷下降，故每段低頻負載的頻率預設值不可過於接近，否則會造成協調不良，甚至卸載失敗。

三、低頻卸載原理

依據搖擺匯流排方程式(1)所示，系統於穩態運轉下，輸入發電機組之機械功率 P_m 等於發電機組輸出至負載之電功率 P_e ，故系統頻率為定值。

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (1)$$

其中：

$$H: \text{發電機組慣性常數(s)}, H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_s^2}{S},$$

代表發電機組於同步轉速時，轉子儲存動能與機組額定容量之比值。

J : 發電機組轉子轉動慣量 ($\text{kg} - \text{m}^2$)

S : 發電機組額定容量 (MVA)

ω_s : 系統額定角頻率 (rad/s)

$$\omega_s = 2\pi f_s$$

f_s : 系統額定頻率 (Hz)

ω : 發電機轉子角頻率 (rad/s)，

$$\omega = 2\pi f$$

f : 系統頻率 (Hz)

P_m : 輸入發電機組之機械功率標么值
(MW / MVA)

P_e : 輸出至負載之電功率標么值
(MW / MVA)

當系統發生大型發電機組跳機時，機械功率 P_m 會下降 ($\Delta P_m \downarrow$)，若供給負載之電功率 P_e 維持不變 ($\Delta P_e = 0$)，則 $P_m - P_e$ 為負值使得系統頻率下降，其下降程度可由方程式(4)求出，相關推導如下所示：

原搖擺方程式(1)以頻率為變數時可改寫為方程式(2)：

$$\frac{2H}{f_s} \frac{df}{dt} = P_m - P_e \quad (2)$$

原方程式(2)之頻率微分值 df 可視為一微小的變動量，再將此變動量除以 f_s 化為標么值 Δf ，可改寫為方程式(3)：

$$2H \frac{d\Delta f}{dt} = P_m - P_e \quad (3)$$

其中：

Δf : 頻率標么值變動量

原方程式(3)取拉式轉換後移項可得方程式(4)：

$$\Delta f = \frac{1}{2sH} (P_m - P_e) = \frac{1}{2sH} (\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (4)$$

其中：

ΔP_m : 輸入機械功率標么值變動量
(MW / MVA)

ΔP_e : 輸出電功率標么值變動量
(MW / MVA)

然而實際上 ΔP_e 是由『與頻率相關之負載變動量 ΔP_f 』及『與頻率無關之負載變動量 ΔP_L 』所組成，如方程式(5)所示：

$$\Delta P_e = \Delta P_L + \Delta P_f \quad (5)$$

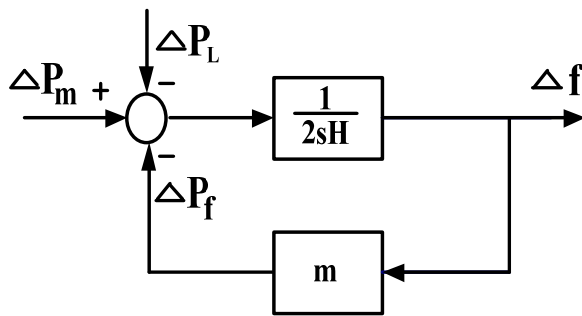
因此當系統頻率變動時， ΔP_f 會隨著系統頻率而變化，因此 ΔP_e 也跟著改變，其中 ΔP_f 可藉由系統的匯流排電壓變動量與頻率變動量估算，如方程式(6)所示：

$$\Delta P_f = \frac{\partial P}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f \quad (6)$$

原方程式(6)式除以 Δf ，可求出負載綜合頻率係數 m ，如方程式(7)所示：

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta f} = \frac{\partial P}{\partial V} \frac{\Delta V}{\Delta f} + \frac{\partial P}{\partial f} = m \quad (7)$$

綜合以上所述，當系統運轉頻率因為大型發電機組跳機或重要輸電線路解聯而下降時，欲使系統運轉頻率回升至最低安全運轉頻率(59.5Hz)以上運轉，須自 P_L 及 P_f 中卸除部分負載，且卸載量之總和約等於 ΔP_m ；此外，結合方程式(4)、(5)、(7)，可得到完整之模型方塊圖(如圖一所示)。



圖一. 低頻卸載模型方塊圖

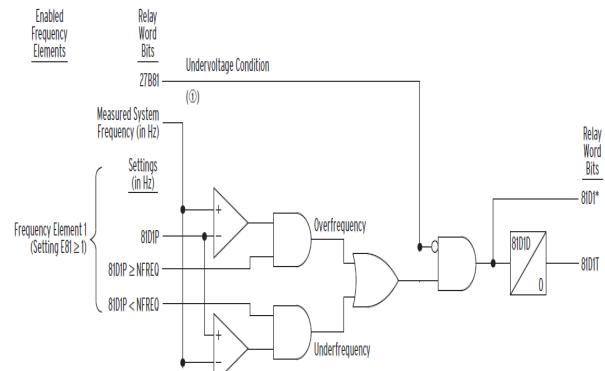
四、頻率保護邏輯

頻率保護使用的邏輯十分簡易，不需使用複雜的邏輯即可完成，以SEL製SEL-351型數位電驛為例，相關內容包括：頻率保護邏輯(如圖二所示)、欠電壓閉鎖頻率保護邏輯(如圖三所示)、頻率保護元件說明(如表二所示)及頻率保護軟體操作介面(如圖四所示)。

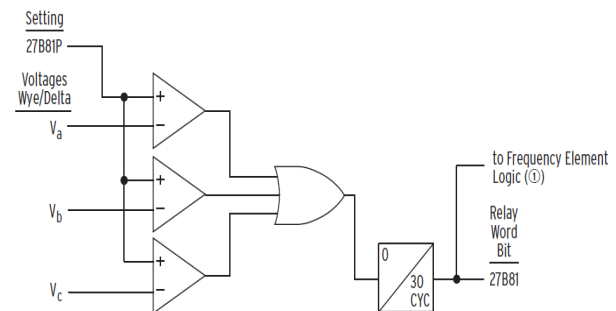
頻率保護邏輯是指當電驛測量到的系統頻率(Measured System Frequency)低於頻率保護始動元件(81D1P~81D6P)和系統額定頻率(Nominal Frequency)時，Underfrequency邏輯閘之輸出即為高電位，此時再與27B81做AND運算，若AND邏輯閘的輸出仍為高電位，則經由延時時間(81D1D~81D6D)後送出低頻跳脫訊號(81D1T~81D6T)，將預設的負載切離。

欠電壓閉鎖頻率保護邏輯是指當電驛測量到的電壓若小於欠電壓閉鎖頻率保護始動元件(27B81P)時，代表可能是周邊的

變電設備發生故障或現場變電所正在執行PT迴路改接所導致，故27B81(Relay Word Bit)的輸出將為高電位，閉鎖頻率保護邏輯。



圖二. 頻率保護邏輯



圖三. 欠電壓閉鎖頻率保護邏輯

表二. 頻率保護元件說明

	頻率保護元件	說明
1	E81	代表是否開啟電驛內的頻率保護邏輯及數量(最多6組)，若要啟用可依需求設為(1~6)，不啟用則設為N。
2	81D1P ~ 81D6P	代表頻率保護邏輯中，第1~6組的頻率保護始動元件。
3	27B81P	代表欠電壓閉鎖頻率保護邏輯中，欠電壓閉鎖頻率保護始動元件。
4	81D1D ~ 81D6D	代表頻率保護中，81D1P~81D6P與27B81執行AND運算後之延時設定。

Frequency Elements

E81 Enable Frequency Elements

E81 Frequency Elements Enables
 Select: N, 1-6

27B81P Undervoltage Block (Volts secondary)
 Range = 20.00 to 150.00

Level 1

81D1P Level 1 Pickup (Hz)
 Range = 41.00 to 65.00, OFF

81D1D Level 1 Time Delay (cycles in 0.25 increments)
 Range = 2.00 to 16000.00

Level 2

81D2P Level 2 Pickup (Hz)
 Range = 41.00 to 65.00, OFF

81D2D Level 2 Time Delay (cycles in 0.25 increments)
 Range = 2.00 to 16000.00

Level 3

81D3P Level 3 Pickup (Hz)
 Range = 41.00 to 65.00, OFF

81D3D Level 3 Time Delay (cycles in 0.25 increments)
 Range = 2.00 to 16000.00

Level 4

81D4P Level 4 Pickup (Hz)
 Range = 41.00 to 65.00, OFF

81D4D Level 4 Time Delay (cycles in 0.25 increments)
 Range = 2.00 to 16000.00

Level 5

81D5P Level 5 Pickup (Hz)
 Range = 41.00 to 65.00, OFF

81D5D Level 5 Time Delay (cycles in 0.25 increments)
 Range = 2.00 to 16000.00

Level 6

81D6P Level 6 Pickup (Hz)
 Range = 41.00 to 65.00, OFF

81D6D Level 6 Time Delay (cycles in 0.25 increments)
 Range = 2.00 to 16000.00

圖四. 頻率保護軟體操作介面

五、頻率保護特性測試

頻率保護特性測試是指利用測試儀器輸出一個含有電壓與頻率成份之測試訊號，經由電驛的輸入接點送至電驛，電驛依據測試訊號的內容與頻率保護邏輯來判斷是否透過輸出接點送出跳脫訊號至測試儀器，用以檢視數位電驛中頻率保護元件之設定與輸入/輸出接點間是否正常運作，以下試舉SEL製SEL-351型電驛(如圖五所示)與Doble測試儀器(如圖六所示)為例，進行頻率保護特性測試。

頻率保護始動元件(81D1P~81D6P)之測試：今假設電驛之設定：E81=1，頻率保護始動元件81D1P=59.2(Hz)，欠電壓閉鎖

頻率保護始動元件27B81P=60(V)，為了確認81D1P之設定是否正確，可利用測試儀器輸出一電壓大小為110V、頻率為59.5Hz之測試訊號至電驛的輸入接點，此時因測試訊號之頻率高於81D1P不符合電驛動作條件，因此電驛不會透過輸出接點送出跳脫訊號至測試儀器；若利用測試儀器將測試訊號之頻率從59.5Hz逐步調降至低於81D1P時，測試儀器即可收到電驛送出的跳脫訊號，代表跳脫訊號的輸出僅和81D1P有關。

動作時間之測試：今假設電驛之設定：E81=1，頻率保護始動元件81D1P=59.2(Hz)，欠電壓閉鎖頻率保護元件27B81P=60(V)，為了測量當電驛的量測頻率降至低於81D1P時，電驛從邏輯判斷到輸出跳脫訊號共需多少時間，可使用Doble微控制器(如圖七所示)預設2種測試模式，其中：A模式：AC 115V、60Hz，B模式：AC 115V、59Hz，接著將電驛的輸入接點接至Doble的訊號輸出接點，電驛的輸出接點則接至Doble的計時接點，當Doble微控制器之測試模式由A模式切換至B模式時，此時電驛會因測試模式的改變由正常狀態轉為送出跳脫訊號至測試儀器，因此可估算出電驛的動作時間。

欠電壓閉鎖頻率保護始動元件(27B81P)之測試：今假設電驛之設定：E81=1，頻率保護始動元件81D1P=59.2(Hz)，欠電壓閉鎖頻率保護始動元件27B81P=60(V)，為了確認27B81P之設定是否正確，可利用測試儀器輸出一電壓大小為40V，頻率為59.0Hz之測試訊號至電驛的輸入接點，此時因測試訊號之電壓低於27B81P不符合電驛動作條件，因此電驛不會透過輸出接點送出跳脫訊號至測試儀器；若利用測試儀器將測試訊號之電壓從40V逐步調升至高於27B81P時，測試儀器即可收到電驛送出的跳脫訊號，代表跳脫訊號的輸出僅和27B81P有關。



圖五. SEL-351型數位電驛



圖六. Doble測試儀器



圖七. Doble微控制器

六、低頻卸載模擬

以台灣電力公司101年度低頻卸載模擬為例，當電力系統發生嚴重核能或大型發電機組跳機時(如表三所示)，須依據電力系統條件(如表四所示)、電力系統規劃卸載量(如表五所示)、電力系統運轉情形(如表六所示)，模擬出低頻卸載量、低頻卸載跳脫段數及卸載後之系統頻率，藉此檢視低頻卸載之規劃是否妥當，進而評估增加或減少低頻卸載量。

模擬結果如表七所示，最糟情況為核二停用兩部機，而系統其餘發電機組均正常運轉下，若龍潭E/S因故南、北端解聯，龍潭以北之系統運轉頻率將下降至58.65Hz，此時透過低頻卸載後，系統運轉頻率將回復至59.99Hz，達到系統安全連續運轉頻率之要求。

表三. 電力系統發生機組跳脫故障情形

1	核三壹部機組跳脫
2	核一兩部機組跳脫
3	核三兩部機組跳脫
4	龍潭E/S南北解聯
5	大潭五部機組跳脫

表七 低頻卸載模擬結果

系統狀況\系統模擬事故	(1) 核三壹部機跳脫	(2) 核一兩部機跳脫	(3) 核三兩部機跳脫	(4) 龍潭 E/S 解聯	(5) 大潭五部機跳脫
系統負載量(MW)	34990.3	34990.3	34990.3	14400.8	34888.4
系統發電量(MW)	34038.3	33718.3	33086.3	10538.1	31288.4
短少發電量(MW)	952	1272	1904	3862.7	3600
低頻動作段數	無	第 11 段	第 5 段	第 5~8 段	第 5、11 段
系統卸載量(MW)	0	1072.9	1800.2	3551.2	2873.1
系統最低頻率(Hz)	59.55	59.4	59.19	58.65	59.11
卸載後回復頻率(Hz)	59.55	59.92	60.00	59.99	59.72

備註：1. (1)、(2)、(3)、(4)指核二停用兩部機，系統其餘發電機組均正常運轉。

2. (5)指系統發電機組均正常運轉條件下。

3. (4)指龍潭以北地區。

4. 低頻動作段數：第 5 段(59.2Hz) 、第 6 段(59.0Hz) 、第 7 段(58.8Hz) 、第 8 段(58.7Hz) 、第 9 段(58.6Hz) 、第 10 段(58.5Hz) 、第 11 段(59.5Hz+延時 50Sec) 、第 12 段(58.4Hz) 、第 13 段(58.3Hz) 。

表四. 電力系統條件

1	系統負載	34888.4MW
2	系統頻率	60Hz
3	功率因數	0.9
4	H慣量	4.1
5	全系統發電與負載綜合頻率係數	0.621

表五. 電力系統規劃卸載量

龍潭以北地區	6830MW
中部地區	3280MW
龍崎以南地區	2586MW
總量	12696MW

表六. 電力系統運轉情形

1	系統發電機組於尖峰時均正常運轉。
2	核二停用兩部機，系統其餘發電機組於尖峰時均正常運轉。

七、結語

低頻卸載雖然不是什麼新奇的發明，但對於維持系統安全而言，卻是重要且不可缺少的一部分；從低頻卸載的初步規劃至頻率保護之邏輯與測試，乃至於最後的模擬驗證，每一個環節都必須相當注意，若稍有疏忽可能導致模擬結果與實際情況不符，因此即時地掌握電力系統運轉情形與各地區之低頻卸載量，才能將低頻卸載之作用發揮至最大值。

此外，當電力系統發生大型發電機組跳機或系統解聯時，不僅造成系統頻率及電壓急速下降，還會產生其它足以影響系統運轉安全的問題(如：電壓崩潰或系統穩定度不佳)，若只採取低頻卸載恐無法有效因應，期望藉由其他特殊保護策略作為支援，以增強系統運轉安全。

八、參考資料

- [1] 李宏任，實用保護電驛，全華科技，1999年5月。
- [2] 台灣電力公司 101 年度低頻卸載規劃報告。
- [3] 台灣電力公司業務處低頻卸載規劃原則與優先次序。
- [4] SEL-351 保護電驛說明書。
- [5] 黃欣媛，台灣電力公司 96 年新進職員實習期滿報告，2008 年 6 月。
- [6] 蕭佳祥，台灣電力公司 96 年新進職員實習期滿報告，2008 年 6 月。
- [7] 李凌霄，台電系統低頻卸載策略之研究，碩士論文，2008 年 6 月。
- [8] 黃漢汶，應用類神經網路於電力系統卸載策略之研究，碩士論文，2003 年 6 月。
- [9] 陸茵、高文秀、張君平，卸載策略對不同負載頻率/電壓阻尼常數之頻率響應研究，聖約翰學報第二十三期。
- [10] 周芳正，應用同步相量量測於大潭發電廠特殊保護系統之研究，碩士論文，2009 年 6 月。
- [11] J. W. O'Sullivan and M. J. O'Malley, "Identification and Validation of Dynamic Global Load Model Parameters for Use in Power System Frequency Simulation," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 851-857, May. 1996.
- [12] L. Zhang, J. Zhong, "UFLS Design by Using f and Integrating df/dt," Power Systems Conference and Exposition, 2006 IEEE /PES, No. 1, Oct. 2006, pp. 1840-1844.
- [13] V. N. Chuvychin, N. S. Gurov, S. S. Venkata, R. E. Brown, "An Adaptive Approach to Load Shedding and Spinning Reserve Control During Underfrequency Conditions," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 1805-1810, Nov. 1996.
- [14] J. C. Wang, et al., "Development of a Frequency-Dependent Composite Load Model Using the Measure Approach," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 1546 - 1556, Aug. 1994.