

CHƯƠNG 4

ỔN ĐỊNH QUÁ ĐỘ

(TRANSIENT STABILITY)

1. GIỚI THIỆU
2. CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN VỀ ỔN ĐỊNH QUÁ ĐỘ CỦA HTĐ
3. PHƯƠNG PHÁP TÍCH PHÂN SỐ
4. MÔ PHỎNG ĐÁP ỨNG ĐỘNG CỦA HTĐ
5. PHƯƠNG PHÁP TRỰC TIẾP PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH QUÁ ĐỘ

cuu duong than cong . com

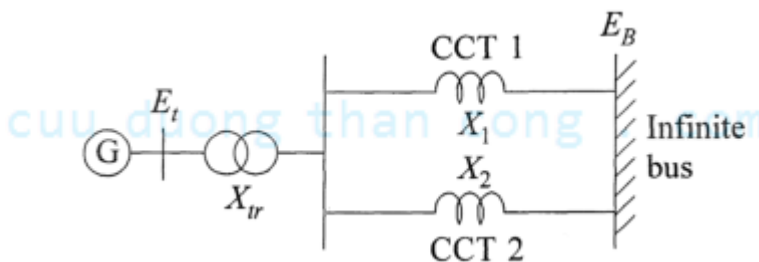
cuu duong than cong . com

1. GIỚI THIỆU

- Ổn định quá độ (transient stability) là khả năng của HTĐ duy trì chế độ đồng bộ khi chịu tác động của các nhiễu quá độ nghiêm trọng như sự cố trên HT truyền tải, mất máy phát, hoặc mất phụ tải lớn.
- Đáp ứng của HTĐ đối với các nhiễu như vậy liên quan đến dao động lớn của góc rotor máy phát, dòng CS, điện áp nút, và các biến HT khác.
- Nếu góc tương đối giữa các máy phát trong HT nằm trong giới hạn nhất định, HT sẽ duy trì chế độ đồng bộ. Ngược lại, HT sẽ mất ổn định.
- Mất đồng bộ do mất ổn định quá độ, nếu có, sẽ thể hiện trong thời gian từ 2 đến 3 giây sau khi chịu tác động của nhiễu. Do đó, thời gian mô phỏng cần thiết để xác định khả năng ổn định quá độ của HT thường là 5 giây
- Trong chương này, các nội dung sau đây sẽ được trình bày:
 - Minh họa bản chất của bài toán ổn định quá độ
 - Chỉ ra các yếu tố ảnh hưởng đến ổn định quá độ
 - Mô tả mô hình HTĐ và các kỹ thuật áp dụng trong phân tích ổn định quá độ.

2. CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN VỀ ỔN ĐỊNH QUÁ ĐỘ CỦA HTĐ

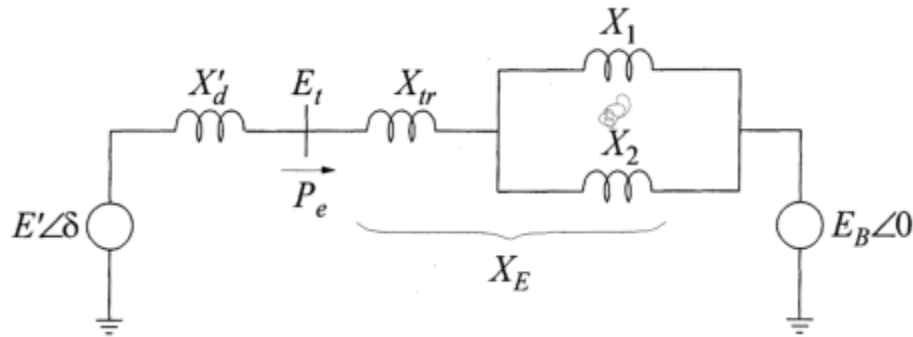
- Xét HTĐ đơn giản bao gồm MF cung cấp điện cho thanh góp vô cùng lớn thông qua một MBA và hai đường dây truyền tải như sau:



Hình 1

- Để trình bày các khái niệm và nguyên lý cơ bản của ổn định quá độ, xét mô hình rất đơn giản, trong đó MF được biểu diễn bởi mô hình cổ điển, bỏ qua ảnh

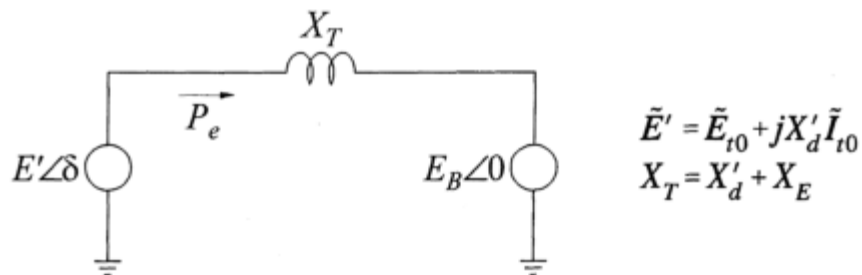
hưởng của bộ điều tốc MF và điện trở của các mạch điện. Sơ đồ thay thế của HTĐ trong trường hợp này được cho như sau:



Hình 2

Điện áp đặt sau điện kháng quá độ (X'_d) được ký hiệu là E' . Góc rotor δ là góc E' vượt trước E_B . Khi HT bị tác động của nhiễu, biên độ của E' được duy trì không đổi tại giá trị trước khi bị nhiễu trong khi đó góc δ thay đổi khi tốc độ rotor MF lệch khỏi tốc độ đồng bộ.

- Mô hình HTĐ có thể được rút gọn như sau:



Hình 3

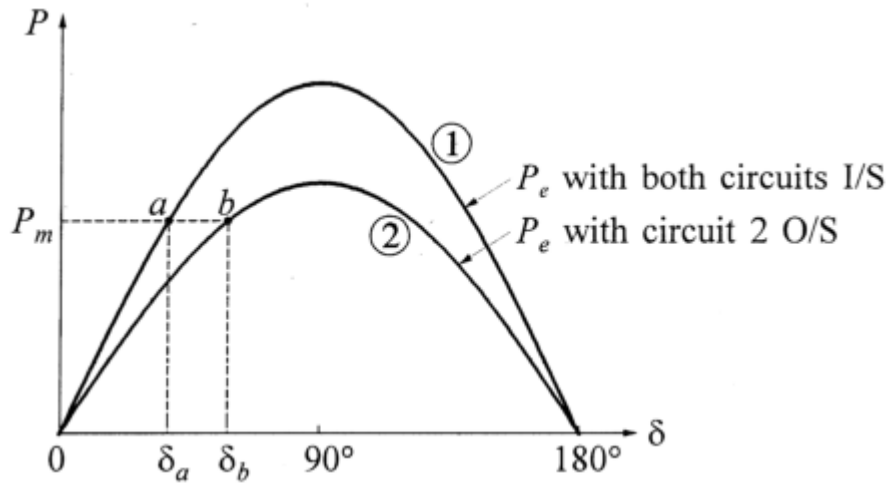
- Công suất điện đầu ra của MF:

$$P_e = \frac{E' E_B}{X_T} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \quad (1)$$

Trong đó

$$P_{\max} = \frac{E' E_B}{X_T} \quad (2)$$

- Vì điện trở stator được bỏ qua, P_e biểu diễn CS khe hở không khí cũng như CS đầu cực MF. Mỗi quan hệ CS-góc khi cả 2 ĐDTT đều làm việc (I/S: In Service) được cho bởi đường cong số 1. HTĐ sẽ làm việc ở điểm a, tại đó CS cơ, P_m , bằng CS điện và góc rotor tương ứng là δ_a .



Hình 4

- Nếu một trong hai ĐDTT không làm việc (O/S: Out of Service), điện kháng tương đương X_T sẽ tăng lên. Đường đặc tính công suất-góc sẽ thay đổi thành đường cong số 2 trên Hình 4 trong đó CS cực đại giảm xuống. Nếu CS cơ P_m không đổi, HT sẽ làm việc tại điểm b với góc rotor tương ứng là δ_b lớn hơn δ_a .
- Trong quá trình chịu tác động của nhiễu, độ lệch tốc độ ($\Delta\omega_r = d\delta/dt$) rất bé so với tốc độ đồng bộ ω_0 , do đó trong thực tế có thể xem tốc độ của MF bằng tốc độ đồng bộ (điều này không có nghĩa là tốc độ của rotor MF không đổi) và trong hệ đơn vị tương đối mô men và công suất khe hở không khí bằng nhau. Chính vì điều này, trong pt dao động, mô men và CS được sử dụng thay thế cho nhau. Pt chuyển động hoặc pt dao động có thể được viết như sau:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_{max} \sin\delta \quad (3)$$

Trong đó

P_m : CS cơ đầu vào, đvtd

P_{max} : CS điện đầu ra cực đại, đvtd

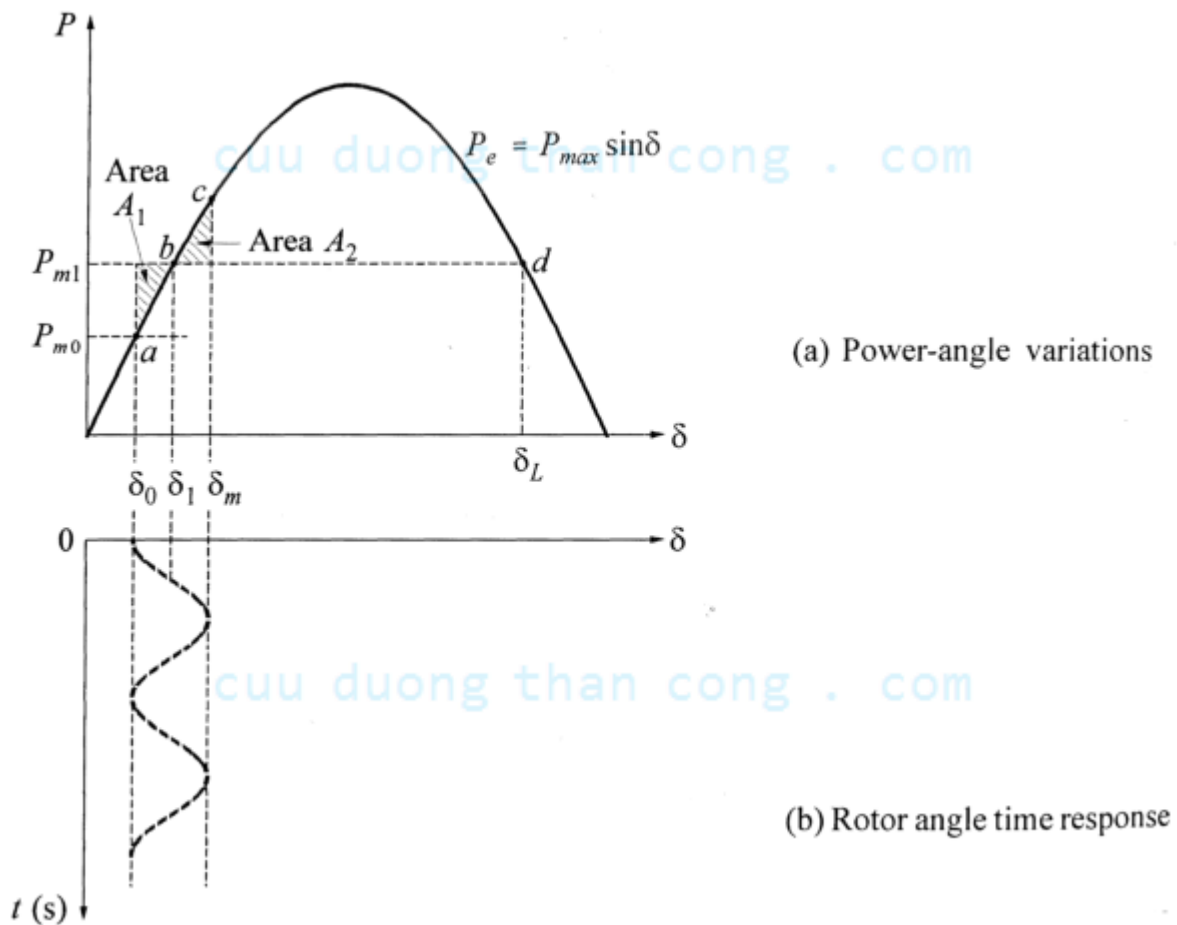
H : Hằng số quán tính, MW.s/MVA

δ : Góc rotor, rad điện

t : Thời gian, giây.

2.1. Đáp ứng đối với sự thay đổi của công suất cơ đầu vào

• Xét trường hợp cả hai mạch ĐDTT đều làm việc và nhiễu tác động vào HT có dạng CS cơ đầu vào thay đổi đột ngột từ giá trị P_{m0} đến giá trị P_{m1} . Đường đặc tính CS-góc và đáp ứng của HT đối với sự thay đổi đột ngột CS cơ được cho dưới đây:



Hình 5

• Ban đầu, HT làm việc tại điểm “a” với $P_e = P_{m0}$ và góc rotor là δ_0 . Khi CS cơ tăng đột ngột đến giá trị P_{m1} , HT sẽ chuyển đến làm việc tại điểm “b”, tại đó $P_e = P_{m1}$ và góc rotor là δ_1 . Tuy nhiên, do quán tính của rotor, góc rotor không thể thay đổi tức thời từ giá trị ban đầu δ_0 đến δ_1 . Tương ứng, điểm làm việc không thể thay đổi tức thời từ “a” đến “b” mà sẽ trải qua quá trình quá độ như sau:

- Khi công suất cơ tăng đột ngột lên giá trị P_{m1} , do góc rotor không thể thay đổi tức thời nên vẫn giữ giá trị ban đầu là δ_0 , tại đó CS điện (theo đường đặc tính CS-góc) vẫn giữ giá trị $P_e = P_{m0}$, nhỏ hơn CS cơ. Điều này dẫn đến sự xuất hiện mô men (công suất) tăng tác dụng lên rotor.
- Mô men tăng tác làm tăng góc rotor từ giá trị ban đầu δ_0 đến giá trị tương ứng với điểm cân bằng mới δ_1 dọc theo đặc tính CS-góc với tốc độ lớn hơn tốc độ đồng bộ (tốc độ tương đối dương) và được xác định bởi pt dao động. Điểm làm việc sẽ thay đổi từ “a” sang “b”.
- Tại “b”, mặc dù công suất tăng tác bằng không ($P_e = P_{m1}$) nhưng do quán tính và vận tốc rotor vẫn còn cao hơn tốc độ đồng bộ, rotor tiếp tục tăng tốc. Khi góc rotor vượt quá giá trị δ_1 , P_e lớn hơn P_{m1} và rotor bắt đầu giảm tốc (nhưng tốc độ tương đối vẫn dương). Điểm làm việc sẽ tiến tới “c”.
- Tại “c”, tuy tốc độ rotor bằng tốc độ đồng bộ (tốc độ tương đối bằng không) nhưng $P_e > P_{m1}$ nên xuất hiện công suất hãm tác có tác dụng làm giảm góc rotor với tốc độ thấp hơn tốc độ đồng bộ (tốc độ tương đối là âm). Điểm làm việc sẽ chuyển từ “c” sang “b”.
- Tại “b”, công suất hãm tác bằng không ($P_e = P_{m1}$) nhưng do quán tính và vận tốc rotor thấp hơn tốc độ đồng bộ, rotor tiếp tục giảm tốc. Khi góc rotor nhỏ hơn giá trị δ_1 , P_e nhỏ hơn P_{m1} và rotor bắt đầu tăng tốc (nhưng tốc độ vẫn còn thấp hơn tốc độ đồng bộ). HT sẽ tiến tới điểm làm việc “a”, tại đó tốc độ rotor bằng tốc độ đồng bộ và tốc độ tương đối bằng không.

- Quá trình lặp lại và điểm làm việc sẽ chuyển từ “a” sang “b” rồi đến “c”. Rotor sẽ dao động xung quanh điểm cân bằng “b” với biên độ không đổi như được vẽ trong Hình 5.
- Tuy nhiên, trong thực tế do có tổn thất, dao động của rotor sẽ tắt dần và HT sẽ tiến tới điểm làm việc xác lập “b” sau một số chu kỳ dao động.

2.2. Tiêu chuẩn cân bằng điện tích (Equal-area Criterion)

- Đối với mô hình hệ thống được xét ở trên, người ta không cần giải pt dao động để xác định góc rotor hoặc sẽ tăng vô hạn hoặc dao động xung quanh vị trí cân bằng.
- Thông tin liên quan đến dao động góc rotor cực đại (δ_m) và giới hạn ổn định có thể nhận được bằng phương pháp đồ thị sử dụng đường đặc tính công suất-góc như được cho trong Hình 5.
- Mặc dù phương pháp này không được áp dụng cho HT nhiều máy phát biểu diễn bởi mô hình chi tiết, nhưng nó rất hữu dụng để hiểu các yếu tố ảnh hưởng đến ổn định quá độ của HTĐ bất kỳ.
- Từ pt (3), ta có mối quan hệ giữa góc rotor và CS tăng tốc:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \quad (4)$$

Vì P_e là hàm phi tuyến của δ , nên, nói chung, pt trên không thể giải một cách trực tiếp.

- Nhân hai vế của (4) với $2d\delta/dt$ và biến đổi ta sẽ có:

$$2 \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0 (P_m - P_e)}{H} \frac{d\delta}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{d\delta}{dt} \right]^2 = \frac{\omega_0 (P_m - P_e)}{H} \frac{d\delta}{dt} \quad (6)$$

Tích phân hai vế sẽ có

$$\left[\frac{d\delta}{dt} \right]^2 = \int \frac{\omega_0 (P_m - P_e)}{H} d\delta \quad (7)$$

• Độ lệch tốc độ ($d\delta/dt$) ban đầu là 0. Tác dụng của nhiễu sẽ làm cho nó thay đổi. Đối với chế độ vận hành ổn định, độ lệch góc rotor phải có giới hạn, nghĩa là nó sẽ đạt đến giá trị cực đại, sau đó sẽ thay đổi chiều, và sau khi HT bị tác động của nhiễu một khoảng thời gian nào đó độ lệch tốc độ ($d\delta/dt$) bằng 0. Vì vậy, từ (7), tiêu chuẩn ổn định có thể được viết:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_m} \frac{\omega_0}{H} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (8)$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta - \int_{\delta_1}^{\delta_m} (P_e - P_m) d\delta = 0 \quad (9)$$

Ở đây, δ_0 và δ_m lần lượt là góc rotor ban đầu và góc rotor cực đại.

Đặt

$$E_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta = \text{area } A_1 \quad (10)$$

$$E_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_m} (P_e - P_m) d\delta = \text{area } A_2 \quad (11)$$

Trong đó, E_1 là năng lượng (cơ năng) tích lũy bởi rotor trong quá trình tăng tốc khi δ thay đổi từ δ_0 đến δ_1 , và diện tích A_1 được gọi là diện tích tăng tốc; E_2 là năng lượng (cơ năng) mất đi trong quá trình hãm tốc khi δ thay đổi từ δ_1 đến δ_m , và diện tích A_2 được gọi là diện tích hãm tốc.

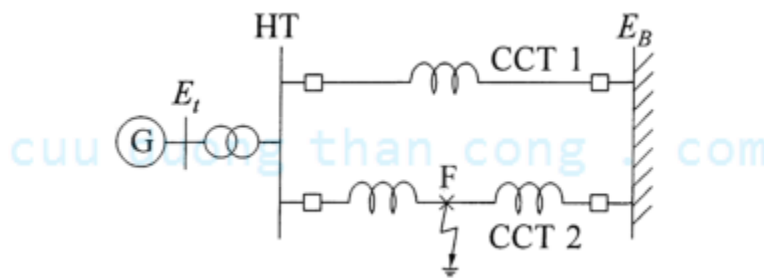
• Như vậy điều kiện để HT ổn định là năng lượng tích lũy trong quá trình tăng tốc phải bằng năng lượng tiêu hao trong quá trình hãm tốc (bỏ qua tổn thất). Hay nói khác đi điều kiện ổn định là diện tích tăng tốc bằng diện tích hãm tốc. Đây chính là tiêu chuẩn cân bằng diện tích (equal-area criterion), nó cho phép

xác định góc rotor cực đại (δ_m) và do đó xác định tính ổn định của HTĐ mà không cần tính toán đáp ứng theo thời gian thông qua việc giải pt dao động.

- Tiêu chuẩn cũng có thể được sử dụng để xác định độ tăng CS cơ cho phép lớn nhất mà HT vẫn ổn định. Ổn định được duy trì nếu diện tích A_1 nhỏ hơn hoặc bằng diện tích lớn nhất có thể có của A_2 . Ngược lại, nếu diện tích A_1 lớn hơn diện tích lớn nhất có thể có của A_2 , khi $\delta > \delta_L$ CS cơ lớn hơn CS điện làm cho góc δ tiếp tục tăng và HT sẽ mất ổn định.

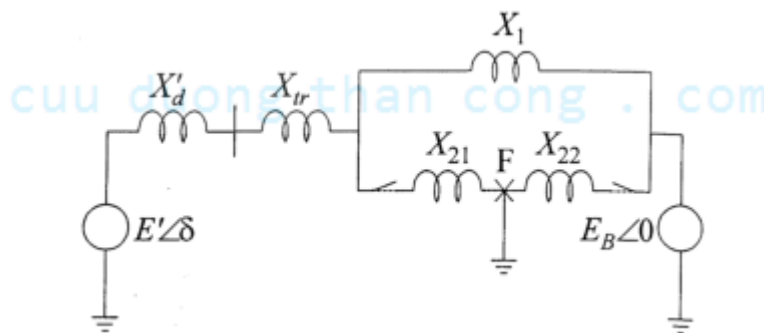
2.3. Đáp ứng đối với sự cố ngắn mạch

- Xét trường hợp sự cố ba pha tại vị trí F trên mạch truyền tải thứ 2 như được cho trong hình dưới đây:



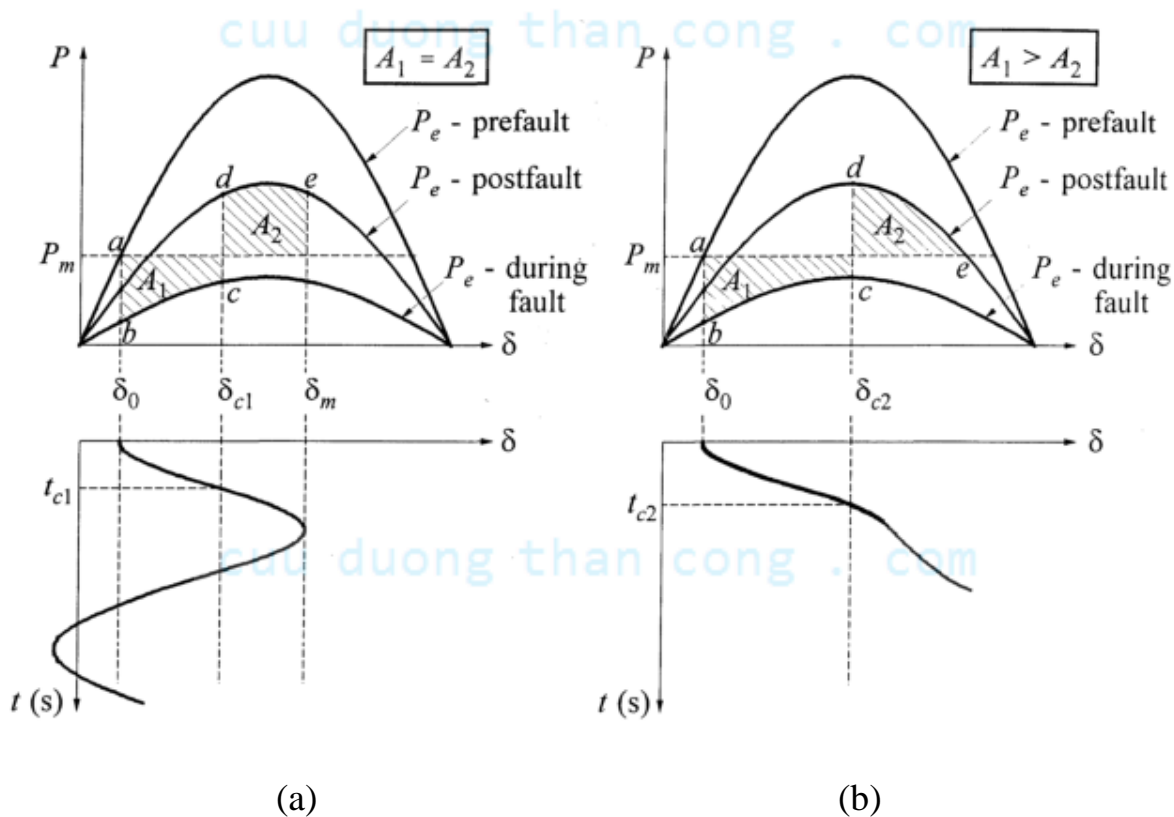
Hình 6

- Giả thuyết MF được biểu diễn bởi mô hình cổ điển, mạch tương đương có dạng như sau:



Hình 7

- Sự cố được xóa bằng cách mở máy cắt ở 2 đầu mạch bị sự cố, thời gian cắt phụ thuộc vào thời gian bảo vệ relay và thời gian cắt của máy cắt.
- Với dạng sự cố cho trước, CS tác dụng của MF trong chế độ sự cố phụ thuộc vào vị trí sự cố. Nếu sự cố ba pha xảy ra tại đầu đường dây truyền tải, CS tác dụng của MF bằng 0. Nếu vị trí sự cố cách đầu gửi của mạch truyền tải một khoảng cách nào đó, CS tác dụng của MF sẽ có giá trị nhất định.
- Trên Hình 8 dưới đây vẽ đặc tính P_e - δ ứng với 3 chế độ: (i) trước sự cố (cả 2 đường dây đều làm việc), (ii) sự cố ngắn mạch 3 pha xảy ra trên đường dây tại vị trí cách đầu đường dây một khoảng cách nào đó, và (iii) sau sự cố (mạch 2 được cắt ra). Hình 8a ứng với thời gian xóa sự cố là t_{c1} và HT ổn định quá độ, trong khi đó hình 8b ứng với thời gian xóa sự cố dài hơn (t_{c2}) và HT mất ổn định. Trong cả 2 trường hợp P_m được giả thiết là không đổi.



Hình 8

• Xét trường hợp ổn định được cho trong Hình 8a, quá trình quá độ xảy ra như sau:

- Trước tiên HT vận hành với cả 2 đường dây truyền tải đều làm việc sao cho $P_e = P_m$ và $\delta = \delta_0$.
- Khi sự cố xảy ra, do quán tính nên góc rotor không thể thay đổi tức thời nên điểm làm việc chuyển từ “a” sang “b”.
- Tại “b”, do $P_e < P_m$, rotor tăng tốc cho tới khi đạt được điểm làm việc “c” tại đó sự cố bị xóa bằng cách cô lập mạch bị sự cố. Điểm làm việc dịch chuyển đột ngột đến “d”.
- Tại “d”, $P_e > P_m$ sinh ra mô men hãm tốc làm giảm tốc độ rotor. Vì tốc độ rotor lớn hơn tốc độ đồng bộ, góc δ tiếp tục tăng cho tới khi động năng tích lũy trong quá trình tăng tốc chuyển hóa hoàn toàn. Điểm làm việc chuyển từ “d” sang “e” sao cho diện tích A_2 bằng diện tích A_1 .
- Tại “e”, tốc độ bằng tốc độ đồng bộ và δ đạt giá trị cực đại δ_m . Vì P_e vẫn lớn hơn P_m , rotor tiếp tục giảm tốc với tốc độ thấp hơn tốc độ đồng bộ. Góc rotor giảm và điểm làm việc sẽ dịch chuyển dọc theo đường đặc tính P_e - δ ứng với chế độ sau sự cố. Giá trị cực tiểu của δ được xác định theo tiêu chuẩn cân bằng diện tích ứng với đường đặc tính sau sự cố. Trong trường hợp bỏ qua tất cả các nguồn cản dục, rotor tiếp tục dao động với biên độ không đổi. Trong thực tế, do có tổn thất nên rotor sẽ dao động tắt dần và HT sẽ đạt được điểm làm việc mới. Đó chính là giao điểm của đường đặc tính sau sự cố và đường thẳng $P = P_m$.
- Khi sự cố được xóa chậm hơn như được thể hiện trong Hình 8b, diện tích A_2 phía trên P_m nhỏ hơn A_1 . Khi điểm làm việc đạt đến điểm “e”, động năng tích lũy trong thời gian tăng tốc chưa chuyển hóa hoàn toàn, do đó tốc độ vẫn lớn hơn tốc độ đồng bộ và δ tiếp tục tăng. Vượt quá điểm “e”, $P_e > P_m$, và rotor bắt đầu tăng tốc trở lại. Tốc độ và góc rotor tiếp tục tăng, dẫn đến mất ổn định.

2.4. Các yếu tố ảnh hưởng đến ổn định quá độ

- Mức độ tải của MF
- Công suất đầu ra của MF trong chế độ sự cố. Điều này phụ thuộc vào vị trí và loại sự cố
- Thời gian xóa sự cố
- Điện kháng hệ thống truyền tải sau sự cố
- Điện kháng máy phát. Điện kháng càng nhỏ CS cực đại càng lớn và góc rotor ban đầu càng nhỏ
- Quán tính MF. Quán tính càng cao, tốc độ thay đổi góc càng bé. Điều này sẽ làm giảm động năng tích lũy trong lúc sự cố, nghĩa là A_1 giảm
- Biên độ điện áp nội của MF (E')
- Biên độ điện áp của thanh góp vô cùng lớn (E_B)

3. CÁC PHƯƠNG PHÁP TÍCH PHÂN SỐ

- Trong trường hợp hệ thống điện đơn giản và MF được biểu diễn bằng mô hình cổ điển như đã trình bày ở mục trên, việc phân tích ổn định có thể thực hiện được bằng phương pháp đồ thị. Thực tế, HTĐ có cấu trúc phức tạp, và để tăng độ chính xác, trong trường hợp tổng quát, MF và các thiết bị khác được biểu diễn bằng mô hình chi tiết. Trong trường hợp này, phương pháp thích hợp nhất để phân tích ổn định là mô phỏng trong miền thời gian: hệ phương trình vi phân phi tuyến được giải bằng phương pháp tích phân số liên tiếp.
- Các ptvp được giải trong phân tích quá độ là hệ ptvp thường phi tuyến với các giá trị ban đầu đã biết có dạng như sau:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) \quad (12)$$

Trong đó, \mathbf{x} là vector trạng thái của n biến độc lập và t là biến thời gian độc lập. Mục đích ở đây là tìm hàm theo thời gian t của \mathbf{x} với giá trị ban đầu tại thời điểm $t = t_0$ là $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$.

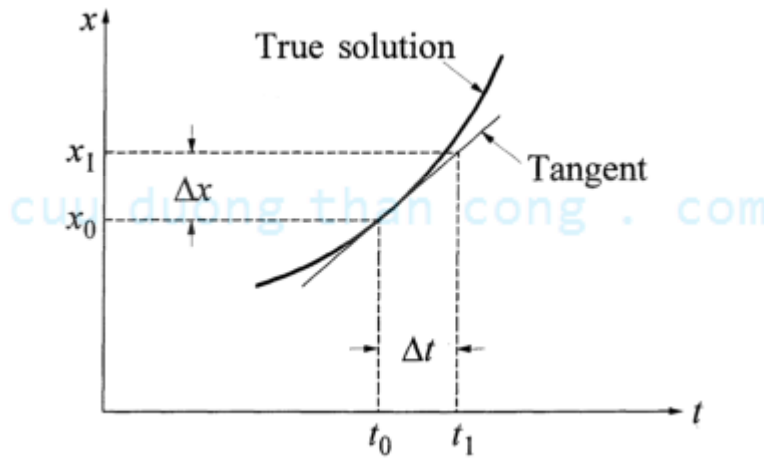
3.1. Phương pháp Euler

- Xét ptvp bậc nhất:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) \quad (13)$$

Với $x = x_0$ tại $t = t_0$.

- Nguyên lý áp dụng phương pháp Euler được minh họa trong hình sau đây:



Hình 9

- Tại $x = x_0$ tại $t = t_0$, đường cong biểu diễn nghiệm của ptvp (13) có thể được xấp xỉ bởi đường tiếp tuyến của nó có độ dốc

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} = f(x_0, t_0) \quad (14)$$

Do đó,

$$\Delta x = \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} \cdot \Delta t \quad (15)$$

- Giá trị của x tại $t = t_1 = t_0 + \Delta t$, ký hiệu là x_1 , được cho bởi

$$x_1 = x_0 + \Delta x = x_0 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} \cdot \Delta t \quad (16)$$

- Sau khi đã có giá trị của x_1 tương ứng với thời điểm t_1 , giá trị của x tại thời điểm $t_2 = t_1 + \Delta t$ được xác định như sau:

$$x_2 = x_1 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_1} \cdot \Delta t \quad (17)$$

- Một cách tương tự, giá trị của x ứng với các thời điểm khác nhau sẽ được xác định.
- Phương pháp Euler chỉ sử dụng đạo hàm bậc nhất nên được gọi là pp bậc nhất. Để tăng độ chính xác cho mỗi bước, Δt phải bé. Điều này sẽ tăng sai số làm tròn, và tăng thời gian và khối lượng tính toán.

3.2. Phương pháp Euler cải tiến

- Phương pháp Euler chuẩn gây ra sai số do chỉ sử dụng đạo hàm tại thời điểm đầu của mỗi phân đoạn và áp dụng cho toàn phân đoạn. Phương pháp Euler cải tiến khắc phục nhược điểm này bằng cách sử dụng giá trị trung bình của đạo hàm tại 2 đầu của mỗi phân đoạn.
- Phương pháp Euler bao gồm 2 bước:
 - (a) Bước dự đoán (Predictor step). Bằng cách sử dụng đạo hàm tại đầu bước tính, giá trị biến x tại cuối bước tính được dự đoán:

$$x_1^p = x_0 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} \cdot \Delta t \quad (18)$$

(b) Bước hiệu chỉnh (Corrector step). Bằng cách sử dụng giá trị dự đoán ở trên, đạo hàm tại cuối bước tính được xác định từ đó xác định giá trị trung bình của đạo hàm được sử dụng để tính giá trị hiệu chỉnh của biến x :

$$x_1^c = x_0 + \frac{1}{2} \left(\left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_1^p} \right) \Delta t \quad (19)$$

3.3. Phương pháp Runge-Kutta (R-K)

- Phương pháp R-K bậc hai

- Giá trị của biến x tại thời điểm $t = t_0 + \Delta t$ được xác định

$$x_1 = x_0 + \Delta x = x_0 + \frac{k_1 + k_2}{2} \Delta t \quad (20)$$

Trong đó

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_0, t_0) \Delta t \\ k_2 &= f(x_0 + k_1, t_0 + \Delta t) \Delta t \end{aligned} \quad (21)$$

- Phương pháp này tương đương với việc xét đến đạo hàm bậc nhất và bậc hai trong chuỗi Taylor; sai số cấp Δt^3 .
- Dạng tổng quát để xác định giá trị biến x cho bước thứ $(n+1)$ là

$$x_{n+1} = x_n + \frac{k_1 + k_2}{2} \Delta t \quad (22)$$

Trong đó

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_n, t_n) \Delta t \\ k_2 &= f(x_n + k_1, t_n + \Delta t) \Delta t \end{aligned} \quad (23)$$

- Phương pháp R-K bậc 4. Công thức tổng quát xác định giá trị biến x tại bước $(n+1)$:

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \Delta t \quad (24)$$

Trong đó

$$\begin{aligned}
 k_1 &= f(x_n, t_n) \Delta t \\
 k_2 &= f\left(x_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t \\
 k_3 &= f\left(x_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t \\
 k_4 &= f(x_n + k_3, t_n + \Delta t) \Delta t
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

3.4. Phương pháp tích phân ẩn (implicit integration method)

- Xét ptvp:

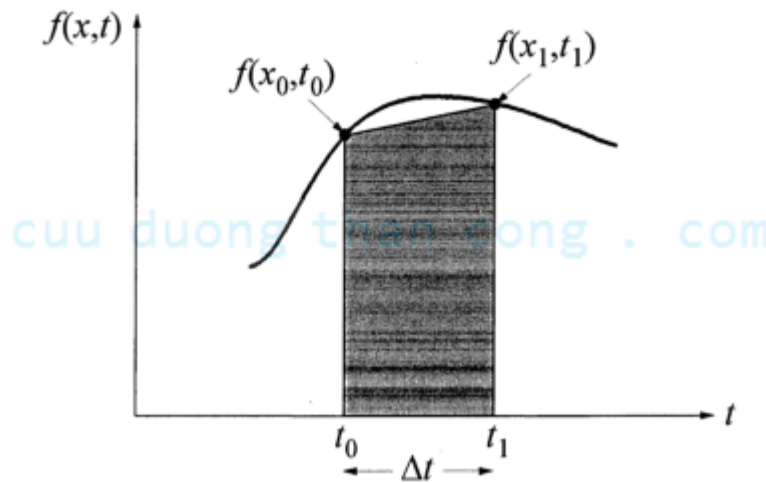
$$\frac{dx}{dt} = f(x, t)
 \tag{26}$$

Với $x = x_0$ tại $t = t_0$.

- Nghiệm x tại thời điểm $t = t_1 = t_0 + \Delta t$ có thể được biểu diễn như sau:

$$x_1 = x_0 + \int_{t_0}^{t_1} f(x, \tau) d\tau
 \tag{27}$$

- Tích phân trong (27) có thể được xác định dựa vào luật hình thang như sau



Hình 10

$$x_1 = x_0 + \frac{\Delta t}{2} [f(x_0, t_0) + f(x_1, t_1)] \quad (28)$$

- Công thức tổng quát để xác định giá trị của x tại $t = t_{n+1}$:

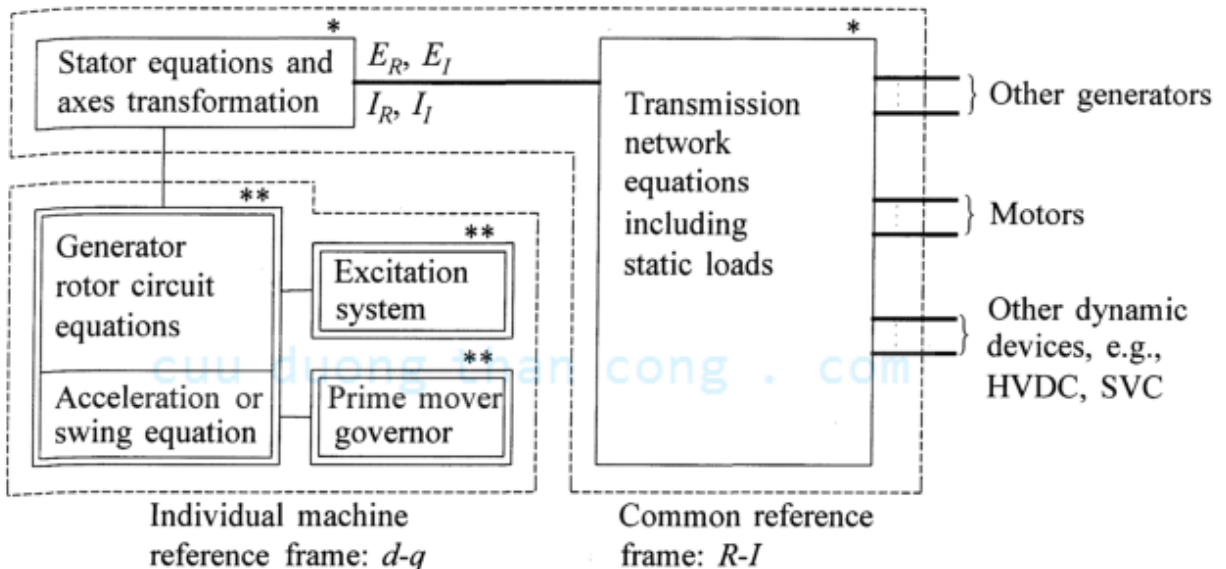
$$x_{n+1} = x_n + \frac{\Delta t}{2} [f(x_n, t_n) + f(x_{n+1}, t_{n+1})] \quad (29)$$

- Từ (29) thấy rằng x_{n+1} xuất hiện ở cả 2 vế của phương trình, do đó phương trình ẩn phải được giải để xác định giá trị của x_{n+1} .

4. MÔ PHỎNG ĐÁP ỨNG ĐỘNG CỦA HTĐ

4.1. Cấu trúc của mô hình HTĐ

- Phân tích ổn định quá độ của HTĐ liên quan đến việc tính toán đáp ứng động phi tuyến của HTĐ đối với các nhiễu lớn, thường là sự cố trên mạng truyền tải, theo sau bởi sự cô lập phần tử sự cố dưới tác động của bảo vệ relay.
- Cấu trúc tổng quát của mô hình HTĐ được sử dụng để phân tích ổn định quá độ được mô tả bởi hình dưới đây:



Hình 11

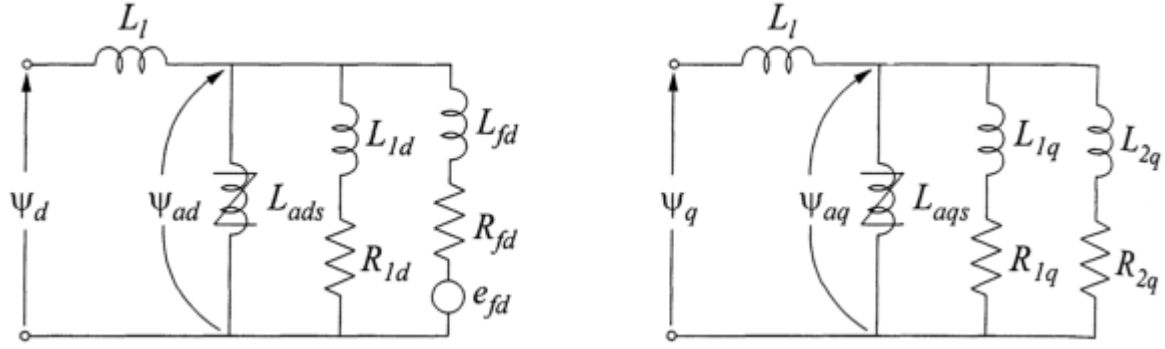
* Các phương trình đại số

** Các phương trình vi phân

- Cấu trúc của mô hình trên tương tự như cấu trúc của mô hình được sử dụng để phân tích ổn định tín hiệu bé, tuy nhiên trong phân tích ổn định quá độ các phương trình phi tuyến được giải. Ngoài ra, tính không liên tục lớn do sự cố và đóng cắt mạch điện và tính không liên tục nhỏ do sự giới hạn của các biến hệ thống cũng được kể đến trong mô hình này. Ngoài các thông tin liên quan đến ổn định, các biến khác như điện áp nút, dòng công suất nhánh và sự làm việc của hệ thống bảo vệ relay cũng được quan tâm.
- Cấu trúc tổng quát của HTĐ bao gồm mô hình của các phần tử sau đây:
 - Máy phát điện đồng bộ, và hệ thống kích thích và động cơ sơ cấp
 - Mạng truyền tải liên kết kể cả các tải tĩnh
 - Tải động cơ đồng bộ và cảm ứng
 - Các thiết bị khác như HVDC và FACTS
- Mô hình được sử dụng cho mỗi phần tử phải thích hợp với bài toán phân tích ổn định quá độ, và các phương trình HT phải được sắp xếp dưới dạng thích hợp để áp dụng các phương pháp số.
- Mô hình toán của toàn bộ HT trong phân tích ổn định quá độ là tập các phương trình vi phân thường và các phương trình đại số cùng với giá trị ban đầu đã biến của các biến hệ thống.

4.2. Biểu diễn của máy phát điện đồng bộ

- Mô hình toán của máy phát điện đồng bộ dùng trong phân tích ổn định quá độ là tập các phương trình vi phân và đại số, trong đó thời gian được tính bằng giây, góc rotor tính bằng radian điện và các đại lượng khác được tính trong hệ đvtd. Mô hình được xây dựng trên cơ sở mạch điện tương đương sau đây:



Hình 12

- Phương trình chuyển động:

$$\begin{aligned} p\Delta\omega_r &= \frac{1}{2H}(T_m - T_e - K_D \Delta\omega_r) \\ p\delta &= \omega_0 \Delta\omega_r \end{aligned} \quad (30)$$

Trong đó:

$\omega_0 = 2\pi f_0$, rad điện/s

$\Delta\omega_r$ = độ lệch tốc độ rotor, đvtd

p = toán tử đạo hàm d/dt

- Phương trình mạch rotor:

$$\begin{aligned} p\Psi_{fd} &= \omega_0 \left[e_{fd} + \frac{(\Psi_{ad} - \Psi_{fd})R_{fd}}{L_{fd}} \right] \\ p\Psi_{1d} &= \omega_0 \left(\frac{\Psi_{ad} - \Psi_{1d}}{L_{1d}} \right) R_{1d} \\ p\Psi_{1q} &= \omega_0 \left(\frac{\Psi_{aq} - \Psi_{1q}}{L_{1q}} \right) R_{1q} \\ p\Psi_{2q} &= \omega_0 \left(\frac{\Psi_{aq} - \Psi_{2q}}{L_{2q}} \right) R_{2q} \end{aligned} \quad (31)$$

Từ thông móc vòng tương hỗ trục d và q được cho như sau

$$\begin{aligned}
\psi_{ad} &= -L_{ads}i_d + L_{ads}i_{fd} + L_{ads}i_{1d} \\
&= L''_{ads} \left(-i_d + \frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right) \\
\psi_{aq} &= L''_{aqs} \left(-i_q + \frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right)
\end{aligned} \tag{32}$$

Trong đó

$$\begin{aligned}
L''_{ads} &= \frac{1}{\frac{1}{L_{ads}} + \frac{1}{L_{fd}} + \frac{1}{L_{1d}}} \\
L''_{aqs} &= \frac{1}{\frac{1}{L_{aqs}} + \frac{1}{L_{1q}} + \frac{1}{L_{2q}}}
\end{aligned} \tag{33}$$

Ở đây L_{ads} và L_{aqs} là các giá trị bão hòa của điện cảm tương hỗ được xác định như sau

$$\begin{aligned}
L_{ads} &= K_{sd}L_{adu} \\
L_{aqs} &= K_{sq}L_{aqu}
\end{aligned} \tag{34}$$

Với K_{sd} và K_{sq} được tính trên cơ sở chúng là các hàm số của từ thông móc vòng khe hở không khí ψ_{at} .

- Phương trình điện áp stator. Bỏ qua quá trình quá độ trong mạch stator ($p\psi_d$, $p\psi_q$) và sự thay đổi của tốc độ (ω/ω_0), phương trình điện áp mạch stator được viết như sau:

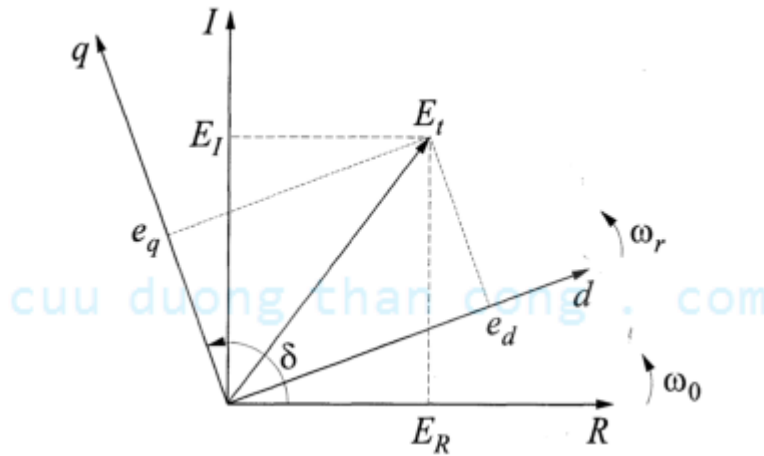
$$\begin{aligned}
e_d &= -R_a i_d + (\bar{\omega} L''_q) i_q + E''_d \\
e_q &= -R_a i_q - (\bar{\omega} L''_d) i_d + E''_q
\end{aligned} \tag{34}$$

Với

$$\begin{aligned}
E_d'' &= -\bar{\omega} L_{aqs}'' \left(\frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right) \\
E_q'' &= \bar{\omega} L_{ads}'' \left(\frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right) \\
L_d'' &= L_l + L_{ads}'' \\
L_q'' &= L_l + L_{aqs}''
\end{aligned} \tag{35}$$

Vì bỏ qua sự thay đổi tốc độ được bỏ qua nên $\bar{\omega} = \omega/\omega_0 = 1$, do đó trong phương trình (34) có thể thay $\bar{\omega} L_d'' = X_d''$ và $\bar{\omega} L_q'' = X_q''$.

Phương trình trên được viết trong hệ quy chiếu d-q của từng máy phát riêng lẻ quay đồng bộ với rotor của nó. Để giải hệ phương trình của mạng liên kết, hệ quy chiếu chung cho toán mạng điện R-I quay đồng bộ sẽ được sử dụng. Sự liên hệ giữa các hệ quy chiếu và phép biến đổi các đại lượng từ hệ quy chiếu này sang hệ quy chiếu khác như sau:



Hình 13

$$\begin{aligned}
e_d &= E_R \sin \delta - E_I \cos \delta \\
e_q &= E_I \sin \delta + E_R \cos \delta \\
E_R &= e_d \sin \delta + e_q \cos \delta \\
E_I &= e_q \sin \delta - e_d \cos \delta
\end{aligned} \tag{36}$$

Áp dụng phép biến đổi (36) cho các đại lượng trong phương trình (34), ta có

$$\begin{bmatrix} E_R \\ E_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_{RR} & X_{RI} \\ -X_{IR} & -R_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_R'' \\ E_I'' \end{bmatrix} \tag{37}$$

Trong đó

$$\begin{aligned}
R_{RR} &= (X_d'' - X_q'') \sin \delta \cos \delta + R_a \\
R_{II} &= (X_q'' - X_d'') \sin \delta \cos \delta + R_a \\
X_{RI} &= X_d'' \cos^2 \delta + X_q'' \sin^2 \delta \\
X_{IR} &= X_d'' \sin^2 \delta + X_q'' \cos^2 \delta
\end{aligned} \tag{38}$$

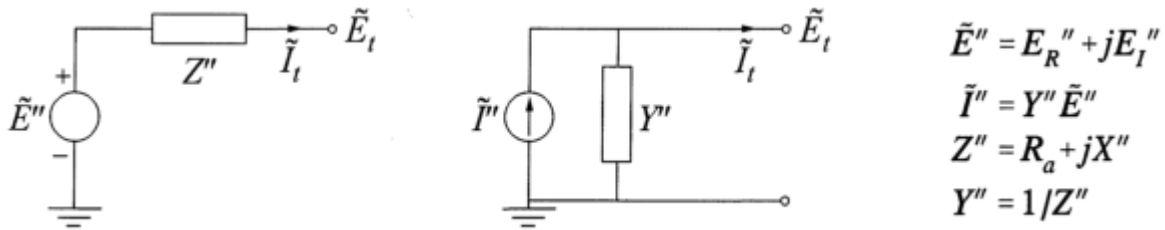
Các thành phần của điện áp nội (bên trong máy phát):

$$\begin{aligned}
E_R'' &= E_d'' \sin \delta + E_q'' \cos \delta \\
E_I'' &= E_q'' \sin \delta - E_d'' \cos \delta
\end{aligned} \tag{39}$$

Nếu đặc tính cực lõi siêu quá độ được bỏ qua thì $L_d'' = L_q''$. Do đó

$$\begin{aligned}
R_{RR} &= R_{II} = R_a \\
X_{RI} &= X_{IR} = \bar{\omega} L_d'' = X_d'' = X_q'' = X''
\end{aligned}$$

Trong trường hợp này $E_R'' + jE_I''$ biểu diễn điện áp đặt sau tổng trở siêu quá độ $R_a + jX''$. Máy phát được biểu diễn bởi mô hình sau đây:



Hình 14

- Công suất tác dụng và phản kháng tại đầu cực máy phát:

$$\begin{aligned} P_t &= e_d i_d + e_q i_q \\ Q_t &= e_q i_d - e_d i_q \end{aligned} \quad (40)$$

- Mô men khe hở không khí:

$$\begin{aligned} T_e &= \psi_d i_q - \psi_q i_d \\ &= \psi_{ad} i_q - \psi_{aq} i_d \end{aligned} \quad (41)$$

Do $\bar{\omega} = \omega/\omega_0 = 1$ nên

$$T_e = P_e = P_t + R_a I_t^2 \quad (42)$$

- Dòng điện cuộn kích thích trong hệ đvtd thuận nghịch:

$$i_{fd} = \frac{\psi_{fd} - \psi_{ad}}{L_{fd}} \quad (43)$$

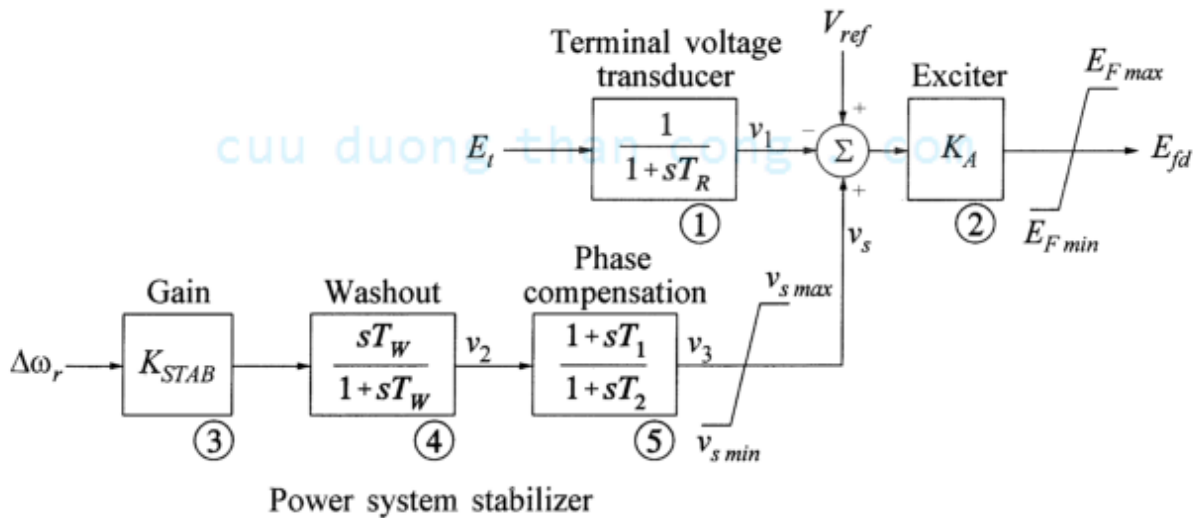
- Dòng điện đầu ra của máy kích thích trong hệ đvtd:

$$I_{fd} = L_{adu} i_{fd} \quad (44)$$

- Giá trị ban đầu của các biến máy phát được xác định bằng cách giải bài toán phân bố công suất của HT trước sự cố
- Mô hình máy phát cô điện và thanh góp vô cùng lớn: Trong trường hợp này thay $X_{RI} = X_{IR} = X_d'$, $E'' = E'$. Góc rotor δ là góc E' vượt trước trục R. Biên độ E' không đổi trong suốt quá trình tính.

4.3. Biểu diễn của hệ thống kích thích

- Để minh họa phương pháp xét hệ thống kích thích trong phân tích ổn định quá độ, giả thiết hệ thống kích thích thuộc loại ST1A có bộ điều chỉnh điện áp tự động (AVR: Automatic Voltage Regulator) và bộ ổn định HTĐ (PSS: Power System Stabilizer) như được cho trong hình dưới đây:



Hình 15

Trong đó, E_{Fmax} và E_{Fmin} phụ thuộc vào điện áp đầu cực máy phát, (E_t) và dòng điện đầu ra của máy kích thích (I_{fd}) được xác định như sau:

$$\begin{aligned} E_{Fmax} &= V_{Rmax} E_t - K_c I_{fd} \\ E_{Fmin} &= V_{Rmin} E_t \end{aligned} \quad (45)$$

- Từ khối 1 Hình 15, ta có

$$pv_1 = \frac{1}{T_R}(E_t - v_1) \quad (46)$$

- Từ khối 3 và 4,

$$pv_2 = K_{STAB} p \Delta \omega_r - \frac{1}{T_W} v_2 \quad (47)$$

Trong đó $p \Delta \omega_r$ được cho trong pt (30)

- Từ khối 5,

$$pv_3 = \frac{1}{T_2} [T_1 pv_2 + v_2 - v_3] \quad (48)$$

Trong đó pv_2 được cho từ pt (47)

- Đầu ra của bộ ổn định là

$$v_s = v_3 \quad (49)$$

Với v_s thỏa điều kiện giới hạn

$$v_{smax} \geq v_s \geq v_{smin} \quad (50)$$

- Từ khối 2, điện áp đầu ra của máy kích thích là

$$E_{fd} = K_A [V_{ref} - v_1 + v_s] \quad (51)$$

Với E_{fd} thỏa điều kiện giới hạn

$$E_{Fmax} \geq E_{fd} \geq E_{Fmin} \quad (52)$$

- Điện áp cuộn kích thích máy phát trong hệ đvtd thuận nghịch:

$$e_{fd} = \frac{R_{fd}}{L_{adu}} E_{fd} \quad (53)$$

- Giá trị ban đầu của các đại lượng của hệ thống kích thích:

$$E_{fd} = \frac{L_{adu}}{R_{fd}} e_{fd}$$

$$v_1 = E_t \quad v_2 = 0 \quad v_s = 0 \quad (54)$$

Giá trị tham chiếu của AVR:

$$V_{ref} = \frac{E_{fd}}{K_A} + v_1 \quad (55)$$

4.4. Biểu diễn của mạng điện truyền tải và tải

- Quá trình quá độ liên quan đến mạng truyền tải tắt dần rất nhanh do đó trong nghiên cứu ổn định mô hình xác lập của mạng truyền tải được sử dụng. Dạng tiện lợi nhất để biểu diễn mạng điện là dạng sử dụng ma trận tổng dẫn nút.
- Tải động như động cơ cảm ứng và động bộ được biểu diễn bởi mô hình động tương tự như máy phát động bộ.
- Tải tĩnh với tổng trở không đổi được biểu diễn bởi tổng dẫn cố định và được xem như là nhánh của mạng điện.
- Tải tĩnh phi tuyến được mô hình như là hàm số mũ hoặc đa thức của biên độ điện áp nút và tần số, và được xử lý như là nguồn dòng. Giá trị của nguồn dòng là:

$$\tilde{I}_L = -\frac{P_L - jQ_L}{\tilde{V}_L^*} \quad (56)$$

- Mô hình của mạng truyền tải/tải bao gồm các phương trình sử dụng ma trận tổng dẫn nút với cấu trúc tương tự như cấu trúc của tổng dẫn nút được sử dụng trong bài toán phân bố công suất. Phương trình có dạng như sau:

$$\tilde{\mathbf{I}} = \mathbf{Y}_N \tilde{\mathbf{V}} \quad (57)$$

- Mô phỏng sự cố: Sự cố tại hoặc gần một nút nào đó được mô phỏng bởi sự thay đổi tổng dẫn riêng của nút đó. Tùy thuộc vào loại sự cố, tổng dẫn tương đương thứ tự nghịch và thứ tự không nhìn từ vị trí sự cố sẽ được tính, kết hợp thích hợp, và thêm vào giữa nút sự cố và nút đất. Điều này sẽ thay đổi tổng dẫn riêng của nút sự cố. Riêng đối với sự cố ngắn mạch 3 pha, tổng trở sự cố bằng không và điện thế của nút sự cố bằng điện thế của đất. Điều này có thể mô phỏng bằng cách nối nút sự cố với đất bằng tổng dẫn vô cùng lớn, trong thực tế thường chọn là 10^6 đvtd với CS cơ bản là 100 MVA.

4.5. Phương trình của toàn hệ thống

- Phương trình của mỗi máy phát và các thiết bị động khác có thể được biểu diễn dưới dạng sau đây:

$$\dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{f}_d(\mathbf{x}_d, \mathbf{V}_d) \quad (58)$$

$$\mathbf{I}_d = \mathbf{g}_d(\mathbf{x}_d, \mathbf{V}_d) \quad (59)$$

Trong đó

\mathbf{x}_d là vector trạng thái của các thiết bị riêng lẻ

\mathbf{I}_d là vector bao gồm phần thực (R) và ảo (I) của dòng điện bơm từ thiết bị vào mạng

\mathbf{V}_d là vector bao gồm phần thực (R) và ảo (I) của điện áp nút.

- Phương trình toàn HT, bao gồm các ptvp (58) cho tất cả các thiết bị và các pt đại số phối hợp cho các thiết bị và mạng, được biểu diễn dưới dạng tổng quát bao gồm tập các ptvp bậc nhất

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \quad (60)$$

và tập các pt đại số

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) = \mathbf{Y}_N \mathbf{V} \quad (61)$$

với tập các giá trị ban đầu cho trước của các biến $(\mathbf{x}_0, \mathbf{V}_0)$.

Trong đó

\mathbf{x} là vector trạng thái của HT

\mathbf{V} là vector điện áp nút

\mathbf{I} là vector dòng điện bơm vào mạng.

Thời gian t không xuất hiện tường minh trong các pt trên.

4.6. Các phương pháp giải các phương trình toàn hệ thống

4.6.1. Cách giải phân ly với tích phân tường minh

- Pt đại số và ptvp được giải tách biệt nhau. Đầu tiên, tại $t = 0^-$, giá trị của biến trạng thái \mathbf{x} và các biến mạng điện \mathbf{V} và \mathbf{I} được biết
- Sau khi bị nhiễu, thường là sự cố mạng điện, biến trạng thái \mathbf{x} không thể thay đổi tức thời. PTĐS (61) được giải trước để tìm giá trị của \mathbf{V} và \mathbf{I} , và dòng công suất tương ứng và các biến không phải là biến trạng thái được quan tâm khác tại $t = 0^+$.
- Sau đó, đạo hàm theo thời gian $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{V})$ được tính toán bằng cách thay các giá trị đã biết của \mathbf{x} và \mathbf{V} vào pt (60). Các đại lượng này được sử dụng để giải PTVP (61) bằng các phương pháp tích phân số tường minh.

4.6.2. Cách giải đồng thời với tích phân ẩn

- Biến trạng thái và biến mạng điện được giải đồng thời. Hay nói khác đi PTVP và PTĐS được giải đồng thời ở từng bước tính.
- Giả thiết tại $t = t_n$, $\mathbf{x} = \mathbf{x}_n$ và $\mathbf{V} = \mathbf{V}_n$. Lời giải của \mathbf{x} tại $t = t_{n+1} = t_n + \Delta t$ được xác định bằng cách áp dụng luật hình thang để giải pt (60):

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{V}_n)] \quad (62)$$

- Từ pt (61), nghiệm \mathbf{V} tại $t = t_{n+1}$ là

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = \mathbf{Y}_N \mathbf{V}_{n+1} \quad (63)$$

- Trong các pt (62) và (63), vector \mathbf{x}_{n+1} và \mathbf{V}_{n+1} là các biến cần xác định. Đặt

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = \mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_n - \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{V}_n)] \quad (64)$$

và

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = \mathbf{Y}_N \mathbf{V}_{n+1} - \mathbf{I}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) \quad (65)$$

- Vector \mathbf{x}_{n+1} và \mathbf{V}_{n+1} được xác định bằng cách giải hệ pt:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = 0$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = 0 \quad (66)$$

- Hệ PTĐS (66) là hệ PTĐS phi tuyến được giải bằng các phương pháp số như Newton-Rapson. Trong đó giá trị ban đầu của các biến được chọn là giá trị của chúng ở bước trước.

cuu duong than cong . com

cuu duong than cong . com

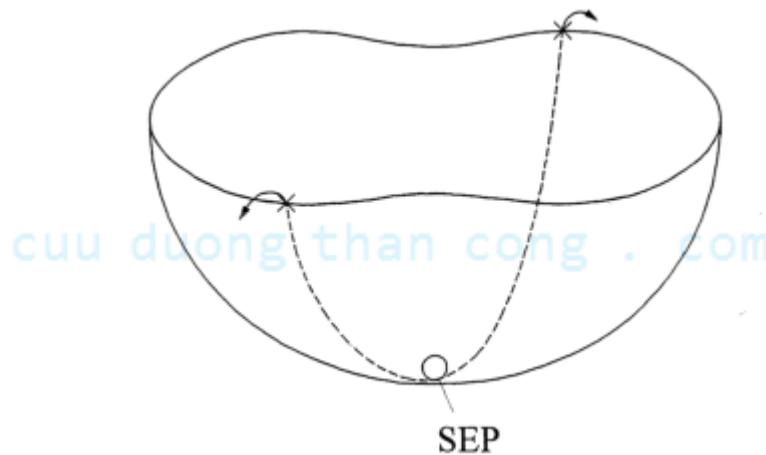
5. PHƯƠNG PHÁP TRỰC TIẾP PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH QUÁ ĐỘ

- Phương pháp trực tiếp phân tích ổn định HTĐ không cần phải giải hệ PTVP.
- Phương pháp này sử dụng năng lượng quá độ để đánh giá ổn định quá độ.
- Là trường hợp đặc biệt của phương pháp thứ hai hoặc phương pháp trực tiếp của Lyapunov.

5.1. Mô tả phương pháp hàm năng lượng quá độ

a. Khảo sát trường hợp quả banh lăn trên mặt bên trong của cái tô

- Phương pháp năng lượng quá độ có thể được mô tả bằng cách khảo sát quả banh lăn bên trong mặt cái tô như sau:



Hình 16

- Mặt bên trong tô biểu diễn vùng ổn định, vùng bên ngoài tô biểu diễn vùng không ổn định.
- Vành tô có hình dạng không đồng đều vì thế các điểm khác nhau có độ cao khác nhau.
- Ban đầu quả banh nằm ở đáy tô và trạng thái này được gọi là điểm cân bằng ổn định (SEP: Stable Equilibrium Point).
- Khi quả banh được truyền một động năng, nó sẽ lăn trên mặt bên trong của cái tô theo một hướng nào đó.

- Vị trí quả banh sẽ dừng phụ thuộc vào lượng động năng ban đầu truyền vào nó.
- Nếu quả banh chuyển hóa toàn bộ động năng thành thế năng trước khi đến vành tô, nó sẽ lăn trở lại và cuối cùng sẽ dừng lại tại điểm cân bằng ổn định. Ngược lại, nếu động năng ban đầu truyền cho quả banh đủ lớn, nó sẽ vượt qua vành tô và sẽ đi vào vùng không ổn định và sẽ không trở lại điểm cân bằng ổn định.
- Mặt bên trong cái tô biểu diễn mặt thế năng, và vành tô biểu diễn mặt giới hạn thế năng (PEBS: potential energy boundary surface).
- Để xác định quả banh có đi vào vùng không ổn định không, hai đại lượng sau đây cần xác định:
 - (a) Động năng ban đầu truyền cho quả banh
 - (b) Độ cao của vành tô tại điểm giao nhau của vành tô và hướng chuyển động ban đầu của quả banh.

b. Áp dụng cho HTĐ

- Cơ sở của việc áp dụng phương pháp TEF để phân tích ổn định HTĐ tương tự như trường hợp quả banh lăn trên mặt bên trong của cái tô.
- Ban đầu HT vận hành tại điểm cân bằng ổn định. Nếu sự cố xảy ra, điểm cân bằng bị phá vỡ và máy phát tăng tốc. HTĐ sẽ tích lũy động năng và thế năng trong thời gian sự cố và HT sẽ dịch chuyển khỏi SEP. Sau khi sự cố được cắt, động năng sẽ chuyển hóa thành thế năng tương tự như trường hợp quả banh lăn trên mặt thế năng. Để tránh mất ổn định HT phải có khả năng hấp thu động năng tại thời điểm các lực tác động vào các máy phát có khuynh hướng mang chúng tiến tới điểm cân bằng mới. Điều này phụ thuộc vào khả năng hấp thu thế năng của HT sau sự cố. Với cấu hình của HT sau sự cố đã biết,

tồn tại giá trị cực đại hoặc tới hạn của năng lượng quá độ mà HT có thể hấp thu. Do đó đánh giá ổn định quá độ đòi hỏi:

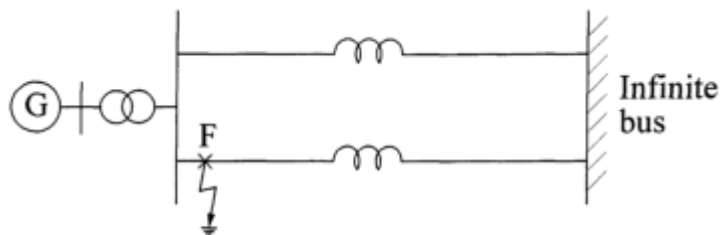
- (a) Hàm số mô tả đầy đủ năng lượng quá độ liên quan đến việc tách một hoặc nhiều máy phát đồng bộ khỏi phần còn lại của HT,
- (b) Việc ước lượng năng lượng tới hạn đòi hỏi để các máy phát mất đồng bộ.
- Đối với HT 2 máy, năng lượng tới hạn được xác định duy nhất, và việc phân tích ổn định trên cơ sở TEF tương tự như tiêu chuẩn cân bằng diện tích. Điều này được minh họa trên Hình 17.

Trong Hình 17(b), góc cắt tới hạn (δ_c) được xác định bằng cách cân bằng diện tích A1 và A2.

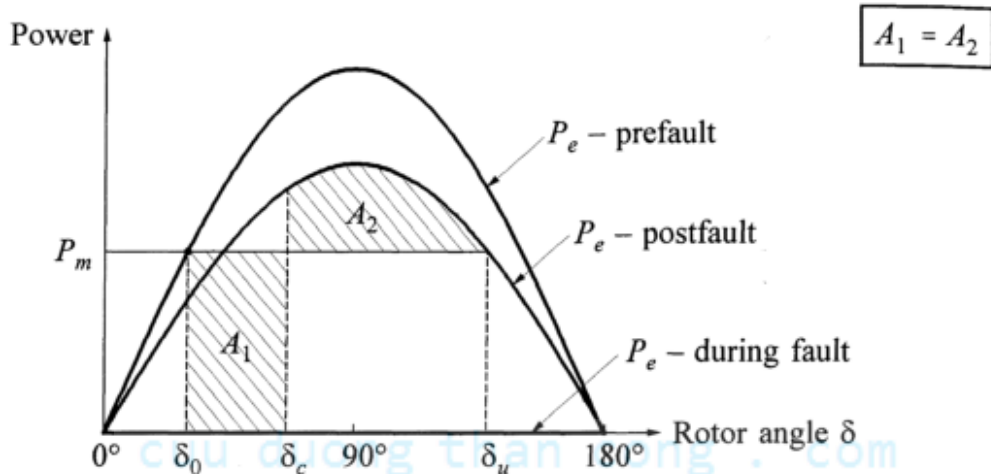
Hình 17(c) minh họa phương pháp năng lượng quá độ được dùng để xác định góc cắt tới hạn dưới dạng động năng và thế năng. Động năng tích lũy trong thời gian sự cố được cộng vào thế năng tại góc rotor tương ứng, và tổng này được so sánh với thế năng tới hạn để xác định ổn định.

Trạng thái của HT tại thời điểm cắt sự cố (x_{cl}) có thể được mô tả bởi giá trị của hàm năng lượng xác định tại x_{cl} , $V(x_{cl})$. Phương pháp trực tiếp giải bài toán ổn định bằng cách so sánh $V(x_{cl})$ với năng lượng tới hạn V_{cr} . HT ổn định nếu $V(x_{cl})$ nhỏ hơn V_{cr} . Đại lượng $V_{cr} - V(x_{cl})$ được gọi là độ dự trữ ổn định.

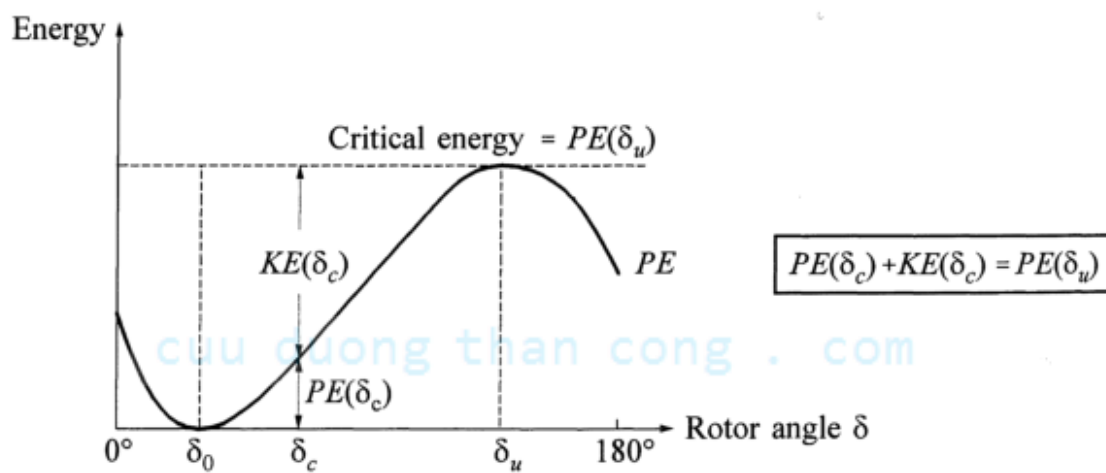
cuu duong than cong . com



(a) System configuration



(b) Power-angle relationships



(c) Energy-angle relationships

Hình 17

5.2. Áp dụng cho HTĐ thực tế

- Việc áp dụng phương pháp trực tiếp cho HTĐ thực tế gặp một số khó khăn, do đó cần có các giả thiết nhằm đơn giản hóa mô hình HTĐ, trong đó máy phát được biểu diễn bởi mô hình cổ điển và tải được biểu diễn bởi tổng trở không đổi. Gần đây có một số nghiên cứu để mở rộng việc áp dụng của phương pháp này cho các mô hình chi tiết.
- Nếu ma trận tổng dẫn nút của HT được thành lập có kể đến điện kháng quá độ của máy phát và tổng trở không đổi của tải, mối quan hệ giữa vector dòng điện và điện áp nội của các máy phát có thể diễn tả bởi phương trình:

$$\mathbf{I}_G = \mathbf{Y}_R \mathbf{E}_G \quad (67)$$

Trong đó, \mathbf{I}_G và \mathbf{E}_G là vector dòng điện và vector điện áp nội của máy phát; \mathbf{Y}_R là ma trận tổng dẫn rút gọn với các nút không phải nút máy phát đã được khử.

- Gọi điện áp nội của máy phát thứ i là

$$\tilde{E}_i = E_i \angle \delta_i$$

Phần tử hàng i cột j của ma trận \mathbf{Y}_R là

$$y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$$

- Với HT có n máy phát, công suất tác dụng phát ra của máy phát thứ i là

$$\begin{aligned} P_i &= \operatorname{Re}(\tilde{E}_i \tilde{I}_i^*) \\ &= \operatorname{Re}(\tilde{E}_i \sum_{j=1}^n \tilde{y}_{ij}^* \tilde{E}_j^*) \\ &= E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j \{ B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \} \end{aligned} \quad (68)$$

- Để áp dụng phương pháp TEF, trước hết người ta đưa ra khái niệm tâm quán tính (COI: centre of inertia). Vị trí của tâm quán tính của tất cả các máy phát được xác định như sau:

$$\delta_{COI} \triangleq \frac{1}{H_T} \sum_{i=1}^n H_i \delta_i \quad (69)$$

Trong đó, H_T là tổng các hằng số quán tính của n máy phát trong HT

- Chuyển động của COI được xác định bởi 2 pt sau:

$$2H_T p(\Delta\omega_{COI}) = P_{COI} = \sum_{i=1}^n (P'_{mi} - P_{ei}) \quad (70)$$

$$p(\delta_{COI}) = (\Delta\omega_{COI})\omega_0 \quad (71)$$

Với

$$P'_{mi} = P_{mi} - E_i^2 G_{ii} \quad (72)$$

$$P_{ei} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [C_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + D_{ij} (\delta_i - \delta_j)] \quad (73)$$

Trong đó,

P_{mi} : Công suất cơ đầu vào của máy phát thứ i

$$C_{ij} = E_i E_j B_{ij}$$

$$D_{ij} = E_i E_j G_{ij}$$

ω_0 : Tốc độ đồng bộ, rad/s (rad điện)

$\Delta\omega_{COI}$: Độ lệch tốc độ của COI so với tốc độ đồng bộ, đvtd

- Chuyển động của các máy phát so với tâm quán tính được biểu diễn bằng cách định nghĩa

$$\theta_i = \delta_i - \delta_{COI} \quad \text{rad} \quad (74)$$

$$\omega_i = \frac{\dot{\theta}_i}{\omega_0} = \left(\frac{\dot{\delta}_i}{\omega_0} - \Delta\omega_{COI} \right) \quad \text{pu} \quad (75)$$

- Phương trình chuyển của máy phát thứ i trong hệ quy chiếu COI là

$$2H_i p(\omega_i) = P'_{mi} - P_{ei} - \frac{H_i}{H_T} P_{COI} \quad (76)$$

$$p(\theta_i) = \omega_i \omega_0 \quad (77)$$

Ở đây, ω_i là tốc độ của máy phát thứ i so với COI, đvtd

- Hàm năng lượng V mô tả năng lượng quá độ của toàn HT sau sự cố được định nghĩa như sau:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n J_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^n P'_{mi} (\theta_i - \theta_i^s) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^s) - \int_{\theta_i^s + \theta_j^s}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \right] \quad (78)$$

Trong đó:

θ_i^s : góc của máy phát thứ i ở chế độ cân bằng ổn định sau sự cố

$J_i = 2H_i \omega_0$: Mô men quán tính của máy phát thứ i , đvtd

- Hàm năng lượng quá độ bao gồm bốn thành phần sau đây:

(a) Sự thay đổi động năng rotor của tất cả các máy phát trong hệ quy chiếu COI:

$$\frac{1}{2} \sum J_i \omega_i^2$$

(b) Sự thay đổi thế năng rotor của tất cả các máy phát so với COI:

$$\sum P'_{mi} (\theta_i - \theta_i^s)$$

(c) Sự thay đổi năng lượng từ trường tích trữ trong tất cả các nhánh:

$$\sum \sum C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^s)$$

(d) Sự thay đổi năng lượng tiêu tán trong tất cả các nhánh:

$$\sum \sum \int D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j)$$

cuu duong than cong . com

- Thành phần thứ nhất được gọi là động năng (V_{ke}) là hàm số của tốc độ của các máy phát.
- Tổng của 3 thành phần còn lại được gọi là thế năng (V_{pe}) là hàm số của góc rotor của các máy phát.
- Đánh giá ổn định quá độ bao gồm các bước sau đây:

(1) Tính toán năng lượng tới hạn V_{cr}

(2) Tính toán tổng năng lượng HT tại thời điểm cắt sự cố V_{cl}

(3) Tính toán chỉ số ổn định: $V_{cr} - V_{cl}$. HT sẽ ổn định nếu chỉ số là dương.

- Mô phỏng trong miền thời gian được thực hiện cho tới thời điểm cắt sự cố để xác định góc rotor và tốc độ của các máy phát. Các đại lượng này được dùng để tính tổng năng lượng của HT tại thời điểm cắt sự cố.

- Tính toán V_{cr} , tức là đường bao của vùng ổn định, là bước khó khăn nhất trong việc áp dụng phương pháp TEF. Có nhiều phương pháp xác định V_{cr} đã được đề nghị, trong đó phương pháp đơn giản nhất được trình bày dưới đây.

Phương pháp điểm cân bằng không ổn định (UEP: Unstable Equilibrium Point) gần nhất

- Việc tính toán V_{cr} bao gồm 2 bước:
 - Bước 1: Xác định tất cả các UEP. Điều này đạt được bằng cách giải hệ pt mô tả chế độ xác lập của HT sau sự cố bằng phương pháp số với các giá trị ban đầu khác nhau của góc pha của điện áp nút.
 - Bước 2: Tính toán thế năng của HT tại mỗi UEP nhận được ở bước 1. Năng lượng tới hạn là giá trị nhỏ nhất của tất cả các thế năng tính toán tại các UEP.
- Phương pháp này đơn giản. Tuy nhiên, kết quả tính toán rất dè dặt, do chuyển động của HT được giả thuyết là hướng tới trạng thái cân bằng không ổn định có thế năng nhỏ nhất.