

# Tính toán mô phỏng hệ thống kích từ, bộ PSS và máy phát điện đồng bộ của hãng GE

## Calculation and simulation of the excitation system, the PSS and the synchronous generator of GE manufacturer

Đào Thanh Oai  
Trung tâm dịch vụ sửa chữa EVN  
Email: oaidt.evnpssc@gmail.com

### Abstract

Using classic block model units of excitation system and Phillips-Hefferon PSS units for simulation purpose. The excitation system and its parameters are modeled according to the design documents of the contractor. The PSS model is modeled after the contractor's design document referring to IEEE 421.5–2005 standard. The coefficients in the model are calculated according to the paper of Demello F.P and Concordia, C. The T'd0, M coefficients are searched in the contractor's turbine generator parameter document. The simulation results compared with the experimental results released by the testing contractor show good matching level. Therefore, this simulation calculation can be applied to other GE units in assessing the effect of the coefficients in the excitation system and the PSS.

### Keywords

AVR, damping ratio, angle of rotor, power system stability, PSS2A, PSS2B, excitation system

### Tóm tắt<sup>1</sup>

Sử dụng mô hình khối kinh điển tổ máy hệ thống kích từ và bộ PSS của Phillips-Hefferon để mô phỏng. Hệ thống kích từ và các thông số hệ thống kích từ được mô hình theo tài liệu thiết kế của nhà thầu. Bộ PSS được mô hình theo tài liệu thiết kế của nhà thầu có tham khảo đối chiếu tiêu chuẩn IEEE 421.5-2005. Các hệ số trong mô hình tính toán theo bài báo của Demello F.P., Concordia, C. Các hệ số T'd0, M tra cứu trong tài liệu thông số turbine máy phát của nhà thầu cấp. Kết quả mô phỏng đối chiếu với kết quả thí nghiệm của tổ máy do nhà thầu thí nghiệm cho thấy khá phù hợp. Do vậy tính toán mô phỏng này có thể áp dụng đối với các tổ máy khác của hãng GE trong việc đánh giá ảnh hưởng của các hệ số cài đặt trong hệ thống kích từ và bộ PSS, lựa chọn các thông số cài đặt của bộ PSS, cũng như tính trung thực của các nhà thầu thí nghiệm.

### Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
K1÷K6	pu	Các hệ số trong mô hình mô phỏng khối tổ máy và AVR của Phillips-Hefferon
K <sub>D</sub>	pu	Hệ số mô men cản
P <sub>e</sub>	pu	Công suất điện
V <sub>ref</sub>	%	Điện áp đặt
V <sub>ter</sub>	%	Điện áp đầu cực
δ	độ	Góc rotor

### Chữ viết tắt

PSS	Power system stabilizer (bộ ổn định hệ thống điện)
AVR	Auto voltage regulator (bộ điều chỉnh điện áp tự động)
NMTĐ	Nhà máy thủy điện
NMNĐ	Nhà máy nhiệt điện
EVN	Tập đoàn điện lực Việt Nam

### 1. Phần mở đầu

Để đáp ứng nhu cầu điện năng cho sự phát triển của xã hội và tăng trưởng kinh tế hệ thống điện Việt Nam ngày càng được mở rộng. Rất nhiều nhà máy điện cũng như các đường dây 500 kV mới được xây dựng và đưa vào sử dụng (NMTĐ Sơn La (2012), NMTĐ Lai Châu 2016, NMTĐ Huội Quảng 2016, NMNĐ Thái Bình 1&2.....) cùng với đó là các chỉ tiêu về chất lượng điện năng như điện áp, tần số, độ tin cậy và ổn định của hệ thống điện cũng phải được nâng lên.

Ngày nay việc sử dụng các nguồn năng lượng sạch như năng lượng mặt trời, năng lượng gió là một xu thế tất yếu. Chỉ tính trong 6 tháng đầu năm 2019 có hơn 80 nhà máy điện mặt trời hòa lưới điện Quốc gia, các nhà máy này chiếm đến 1/10 tổng công suất nguồn của cả nước (tại thời điểm tháng 6/2019). Do tính chất công suất phát của các nhà máy điện này thay đổi liên tục hàng giờ (vì phụ thuộc vào bức xạ mặt trời, gió) nên việc đưa bổ sung các nhà máy điện mặt trời, nhà máy điện gió vào cũng làm cho việc vận hành hệ thống trở lên phức tạp hơn nhu cầu ổn định hệ thống càng đòi hỏi phải tăng cường.

Thực tế cho thấy gần đây có nhiều sự cố dẫn đến tan rã hệ thống điện mà nguyên nhân do mất ổn định, ví dụ: sự cố tan rã lưới điện tại Brazil (11/3/1999), Bắc Mỹ (14/8/2003), Nam Thụy Điển (23/9/2003),

<sup>1</sup> Ngày nhận bài: 10/12/2019; Ngày nhận bản sửa: 05/01/2020; Ngày chấp nhận: 07/01/2020; Phân biên: Bạch Quốc Khánh, Nguyễn Phùng Quang.

Italia (28/9/2003), Ấn độ (30-31/7/2012), Bangladesh (1/11/2014)... [1]. Chính vì lý do này mà các giải pháp nâng cao độ ổn định của hệ thống điện được ra đời như vận hành song song các đường dây, hay sử dụng bộ ổn định hệ thống PSS, sử dụng SVC... đã được đề xuất từ nhiều năm trước [2], [3].

Trên thế giới đã có nhiều công trình nghiên cứu thiết kế các bộ PSS, đánh giá chất lượng của các bộ PSS đối với ổn định hệ thống điện [2], [3]. Tại Việt Nam các nghiên cứu về PSS chưa nhiều, các công bố chủ yếu dựa trên kết quả mô phỏng lý thuyết và chưa có các nghiên cứu đối với các tổ máy đang vận hành thực tế. Hiện nay các bộ ổn định hệ thống PSS hầu như vẫn chưa được áp dụng tại Hệ thống điện Việt Nam. Tính đến thời điểm hiện tại (12/2019) chưa có một giải pháp thực dụng phổ biến nhằm thí nghiệm đánh giá chất lượng của các bộ PSS tại các nhà máy điện Việt Nam do chính EVN thực hiện.

Ổn định hệ thống điện cũng được Tập đoàn điện lực Việt Nam và các cơ quan quản lý quan tâm thể hiện qua Thông tư số 25/2016-TT-BCT “Quy định về hệ thống điện truyền tải” do bộ Công Thương ban hành ngày 30/11/2016 tại khoản 7 điều 39 quy định về đánh giá vai trò (chất lượng) của bộ PSS đối với hệ thống kích từ qua hệ số tắt và phải thí nghiệm bộ PSS sau mỗi lần đại tu tổ máy. Công văn 1460/EVN-KTSX do tập đoàn điện lực Việt Nam ban hành ngày 17/04/2017 “về việc tăng cường độ tin cậy, ổn định của hệ thống điện Việt Nam” có đề cập kế hoạch đưa bộ các bộ PSS của các nhà máy điện đang hoạt động vào hạn năm 2018 nhưng đến nay (10/2019) mới chỉ triển khai được tại một số tổ máy và tất cả các đơn vị chưa tự thực hiện được mà phải đi thuê các chuyên gia của hãng. Điều đó cho thấy việc gặp khó khăn trong công tác thí nghiệm, hiểu được ý nghĩa các thông số cũng như đánh giá kết quả thí nghiệm.

Trong bài báo này trình bày mô phỏng hệ thống kích từ, bộ PSS và máy phát đối với tổ máy 117 MW do hãng GE cung cấp. Do trong báo cáo thí nghiệm của nhà thầu chỉ cho các dữ liệu thông qua hình ảnh thu được từ kết quả thí nghiệm. Nên các nghiên cứu trong bài báo này cũng đưa ra các con số thông qua hình ảnh để so sánh với kết quả thí nghiệm của tổ máy do nhà thầu thí nghiệm, kết quả so sánh cho thấy mô hình mô phỏng khá phù hợp. Do vậy tính toán mô phỏng này có thể áp dụng tham khảo đối với các tổ máy khác của hãng GE trong việc đánh giá ảnh hưởng của các hệ số cài đặt trong hệ thống kích từ và bộ PSS, lựa chọn các thông số cài đặt của bộ PSS. Thậm chí nếu như thay thế mô hình hàm truyền của AVR phù hợp thì kết quả nghiên cứu này cũng có thể áp dụng đối với các khối tổ máy do hãng khác cấp. Mặc dù nội dung nghiên cứu mang tính chất kinh điển, nhưng nghiên cứu chi tiết đối với tổ máy phát điện thực tế và phân tích các thông số, hệ số cài đặt của nhà thầu cung cấp để ra được kết quả như trình bày trong bài báo này là một việc khó khăn. Bài báo này là thành quả nghiên cứu của tác giả trong 2 năm.

## 2. Thông số cài đặt, tính toán tham số của mô hình và mô hình mô phỏng

### 2.1 Thông số cài đặt, sơ đồ khối hàm truyền của AVR và bộ PSS

- Thông số máy phát điện

#### B.1 Thông số cài đặt của máy phát điện

Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ý nghĩa
Sn	117	MVA	Rated apparent power
	0.85	-	Rated power factor
Un	13.8	kV	Rated stator voltage
F <sub>n</sub>	50	Hz	Rated frequency
T'd0	7.2	s	Direct-axis transient open-circuit time constant
X <sub>d</sub>	0.87	p.u.	Direct-axis synchronous reactance
X'd	0.27	p.u.	Direct-axis transient reactance (unsaturated)
X''d	0.18	p.u.	Direct-axis subtransient reactance (unsaturated)
X <sub>q</sub>	0.58	p.u.	Quadrature-axis synchronous reactance (unsaturated)
X'' <sub>q</sub>	0.19	p.u.	Quadrature-axis subtransient reactance (unsaturated)

- Mô hình khối tổ máy được trình bày tại riêng mục tiếp sau.
- Hằng số quán tính của khối chuyển động (rotor, bánh xe công tác, trục rotor)

#### B.2 Thông số hằng số quán tính khối chuyển động

Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ý nghĩa
H	5.54	s	Moment Inertia Base Sn=117 MVA with J <sub>ign</sub> = 85660 kg.m <sup>2</sup>

- Sơ đồ vòng điều chỉnh chính của bộ điều khiển AVR (hình H.3)
- Hệ số cài đặt của hệ thống kích từ:

#### B.3 Thông số cài đặt chính của bộ AVR

Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ý nghĩa
K <sub>pa</sub> [GRV11]	16.877	p.u.	Voltage regulator proportional gain
K <sub>ia</sub>	-	p.u.	Gain of integral term
T <sub>ia</sub> [TRW2]	5	s	Voltage regulator integral time constant
T <sub>c</sub> [TRW1]	1	s	Lead/lag filter numerator time constant
T <sub>b</sub> [TRW3]	1	s	Lead/lag filter denominator time constant
T <sub>g</sub> [PRW6]	1	s	Voltage feedback numerator time constant
T <sub>f</sub> [TRV6]	1	s	Voltage feedback denominator time constant
V <sub>max</sub>	-	p.u.	Positive limit of integral voltage reference
V <sub>min</sub>	-	p.u.	Positive limit of integral voltage

Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ý nghĩa
			reference
KI	-	-	Integral term validation for inner positive limitation
Kh	-	-	Integral term validation for inner negative limitation
Vrmax [uex_max]	312.089	%	Positive ceiling voltage with nominal generator voltage
Vrmin [uex_min]	-312.089	%	Negative ceiling voltage with nominal generator voltage

- Sơ đồ hàm truyền của bộ PSS (hình H.4)
- Thông số cài đặt của bộ PSS:

**B.3 Thông số cài đặt của bộ PSS**

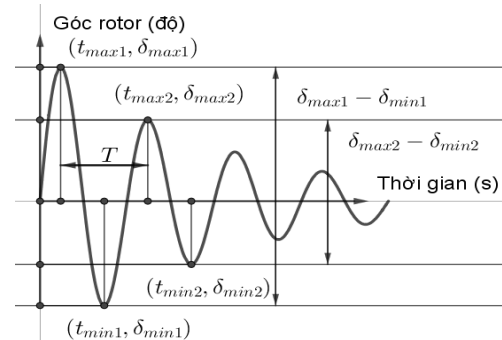
Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ý nghĩa
Ks3	1	p.u.	Mechanical channel gain
tw1	5	s	Speed channel wash-out time constant
tw2	5	s	Speed channel wash-out time constant
tw3	5	s	Power channel wash-out time constant
ks2	0.451	p.u.	Power channel gain
t7	5	s	Phase lead/lag filter high frequency gain
t8	0.6	s	
t9	0.15	s	
m	4	Integer	Ramp track filter parameter
n	1	Integer	Ramp track filter parameter
Ks1	10	p.u.	PSS Gain
	312.089	%	
t1	0.252	s	Phase lead/lad filter numerator time constant (1)
t2	0.025	s	Phase lead/lad filter denominator time constant (1)
t3	0.105	s	Phase lead/lad filter numerator time constant (2)
t4	0.015	s	Phase lead/lad filter denominator time constant (2)
t11	1	s	Phase lead/lad filter numerator time constant (3)
t21	1	s	Phase lead/lad filter denominator time constant (3)
t31	1	s	Phase lead/lad filter numerator time constant (4)
t41	1	s	Phase lead/lad filter denominator time constant (4)
mxfp	0.1	p.u.	Frequency deviation input limitation
mxpe	1.5	p.u.	Active power input

			limitation
Mxsp	0.05	p.u.	Output limitation

**2.2 Mô hình, tham số cài đặt của mô hình mô phỏng**

- Sử dụng mô hình kinh điển khối tổ máy của Phillips-Hefferon để mô phỏng (hình H.5).
- Các hệ số cài đặt của mô hình được tính theo các công thức trong bài báo [4] với các thông số đầu vào nêu trong các bảng trình bày tại mục 2.1, như sau
- $K1 = 1.618397712978028e+00$   
 $K2 = 1.396819530648740e+00$   
 $K3 = 3.934779850272807e-01$   
 $K4 = 8.380917183892439e-01$   
 $K5 = -2.056828010992545e-02$   
 $K6 = 2.717464425521701e-01$
- Các hệ số  $T'_{d0}$ , M tra cứu trong bảng được trình bày tại bảng B.1 và bảng B.2.
- $Wb = 2\pi f = 100\pi$

Vì đã có kết quả thí nghiệm đáp ứng bước nhảy trong thực tế nên ước lượng được hệ số tắt dao động theo bài báo số [5], do vậy có thể ước lượng được hệ số mô men cản  $K_D$  để đưa vào trong mô hình nghiên cứu này. Cụ thể như sau: Trong bài báo [5] đã nêu ra phương pháp tính góc rotor  $\delta$ . Giả sử đồ thị góc  $\delta$  như sau:



**H.1 Đồ thị dao động góc rotor đáp ứng bước nhảy**

Trong hình H.1 ở trên, khoảng cách biên độ giữa hai đỉnh đầu tiên là  $\Delta\delta_1 = \delta_{max1} - \delta_{min1}$  khoảng cách hai đỉnh tiếp theo là  $\Delta\delta_2 = \delta_{max2} - \delta_{min2}$  gọi hệ số  $\sigma$  sẽ được xác định như sau:  $\sigma = \ln(\Delta\delta_2 / \Delta\delta_1)$ . Theo đó công thức tính hệ số tắt dao động như sau:

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} 100\%.$$

Nhưng mặt khác hệ số tắt cũng được xác định bởi công thức  $\zeta = \frac{1}{2} \frac{K_D}{H\omega_n}$  (theo tài liệu

[6]). Do vậy sau một đáp ứng bước nhảy ta tính được  $\omega_n = \Delta\delta_1 / T$  và hệ số tắt  $\zeta$  như trên (trong đó T là chu kỳ dao động ký hiệu trong hình H.1), từ đó ta tính được  $K_D = 4\zeta H\omega_n$  ta sẽ sử dụng hệ số mô men cản này vào mô hình mô phỏng. Đối với tổ máy đang nghiên cứu hệ số mô men cản có giá trị  $K_D = 7$  và được sử dụng làm một đầu vào để mô phỏng trong nghiên cứu của bài báo này.

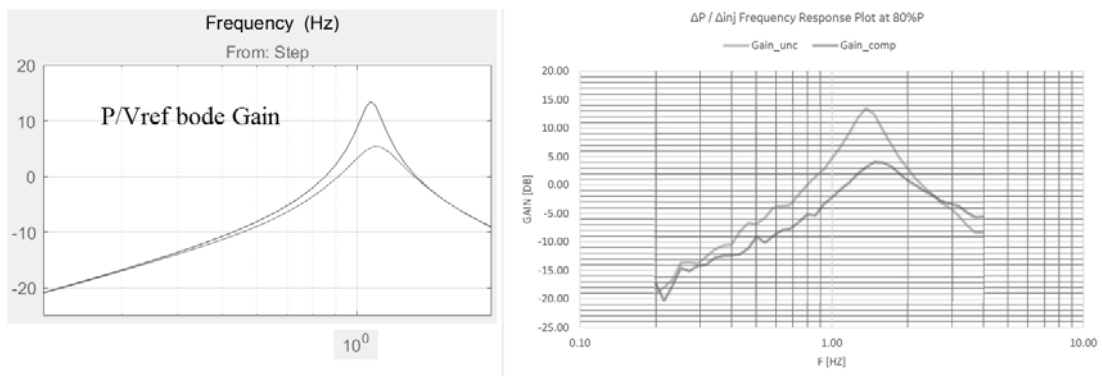


**3.1 Đáp ứng tần số (đồ thị bode biên độ giữa P và Vref)**

Hình H.6 thể hiện đồ thị Bode biên độ P và Vref có và không có PSS. Hình bên trái là kết quả mô phỏng, hình bên phải là kết quả thí nghiệm do nhà thầu thực hiện.

Nhìn vào đồ thị ta thấy biên độ dao động công suất mạnh nhất khi PSS OFF ứng với tần số khoảng 1,2 Hz (theo mô phỏng) và 1,3 Hz theo thực tế. Độ

khếch đại biên độ lớn nhất trong cả mô phỏng lẫn thực tế là khoảng 14 dB. Khi PSS ON thì biên độ dao động công suất ứng với tần số 1,3 Hz (theo mô phỏng) và khoảng 1,4Hz (theo thực tế) độ khuếch đại biên độ trong cả hai trường hợp khoảng gần 5 dB. Điều đó cho thấy khi PSS ON khả năng dập dao động tăng lên 14/3 lần. Tại các tần số khác độ khuếch đại biên độ nhỏ hơn, nghĩa là tổ máy không bị dao động nhiều với các tần số đó.

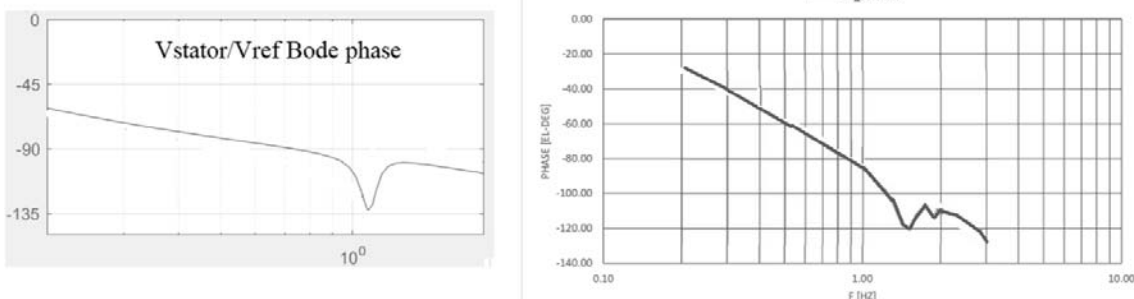


H. 6 So sánh đồ thị Bode biên độ P và Vref có và không có PSS (mô phỏng bên trái, thực tế bên phải)

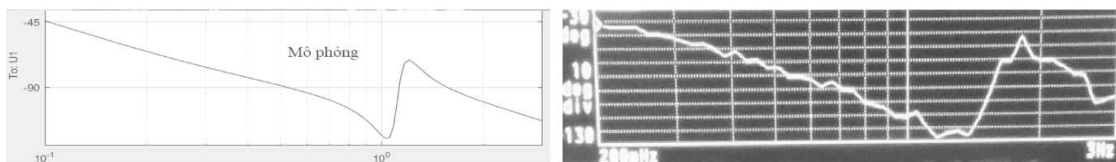
**3.2 Đáp ứng tần số (đồ thị bode pha giữa Vter và Vref)**

Hình H.7 và H.8 thể hiện đồ thị Bode pha giữa Vter và Vref khi không có hình H.7 và có PSS hình H.8. Phần phía bên trái là kết quả mô phỏng, phần phía bên phải là kết quả do nhà thầu cấp (cũng chú ý thêm lần nữa là do nhà thầu chỉ cung cấp kết quả bằng hình ảnh

nên không tiện so sánh trên cùng một đồ thị, ngoài ra như trên đã nêu mục tiêu của nghiên cứu này không phải để thay thế thí nghiệm thực tế mà chỉ để tham khảo khi thí nghiệm điều chỉnh các bộ PSS trong thực tế để hiểu được định tính của tính chất các hệ số được cài đặt, nên việc ghép trên cùng đồ thị để so sánh chi tiết hơn có lẽ là không cần thiết).



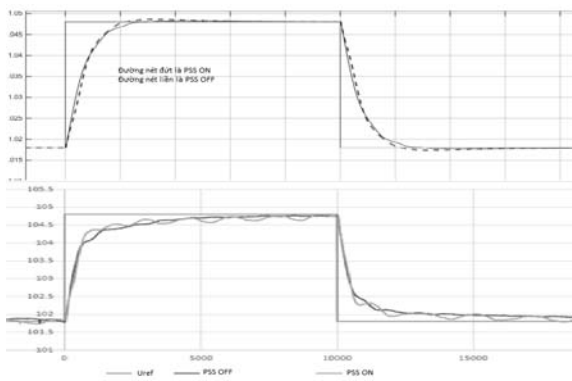
H. 7 So sánh đồ thị bode pha của Vter và Vref không có PSS (mô phỏng bên trái, thực tế bên phải)



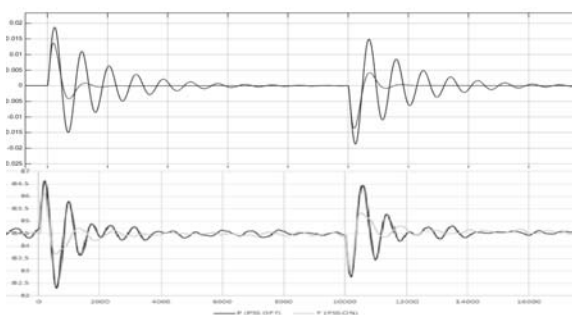
H. 8 So sánh đồ thị bode pha của Vter và Vref có PSS (mô phỏng bên trái, thực tế bên phải)

**3.3 Đáp ứng step**

Đồ thị đáp ứng step tăng 3% duy trì 10 s sau đó giảm về giá trị ban đầu. Hình H.9 là đáp ứng điện áp đầu cực khi PSS ON và PSS OFF. Hình H.10 là đồ thị của công suất tác dụng.



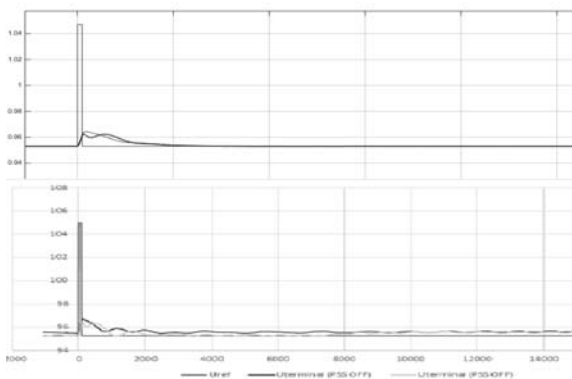
**H. 9** Đồ thị điện áp đầu cực đối với đáp ứng step tăng điện áp đầu cực 3% giữ 10 s sau đó giảm về giá trị ban đầu



**H. 10** Đồ thị công suất tác dụng đối với đáp ứng step tăng điện áp đầu cực 3% giữ 10 s sau đó giảm về giá trị ban đầu

**3.2 Đáp ứng xung (độ rộng xung 10s)**

Đồ thị đáp ứng xung tăng 9.4% duy trì 100 ms sau đó giảm về giá trị ban đầu. Hình H.11 là đáp ứng điện áp đầu cực khi PSS ON và PSS OFF. Hình H.12 là đồ thị của công suất tác dụng.



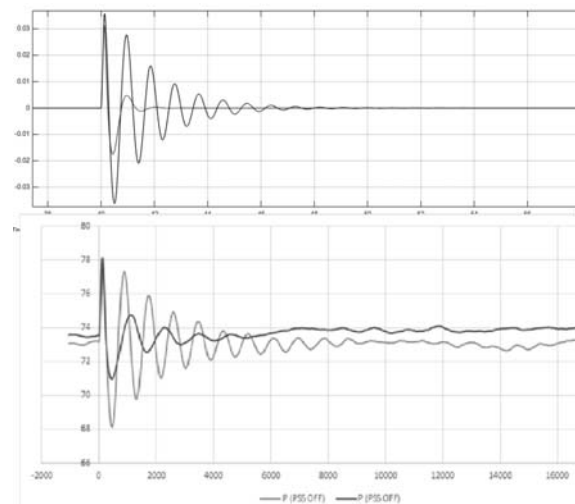
**H. 11** Đồ thị điện áp đầu cực đối với đáp ứng xung tăng 9.4% độ rộng xung 100ms

**4. Kết luận**

Qua việc so sánh kết quả thí nghiệm và mô phỏng cho thấy mô hình mô phỏng là khá phù hợp với thực tế. Do vậy việc tính toán mô phỏng này có thể áp dụng tham khảo đối với các tổ máy khác của hãng GE trong việc đánh giá ảnh hưởng của các hệ số cài đặt trong

hệ thống kích từ và bộ PSS, lựa chọn các thông số cài đặt của bộ PSS, cũng như tính trung thực của các nhà thầu thí nghiệm.

Hơn thế nữa về nguyên tắc hoàn toàn có thể áp dụng nghiên cứu này đối với hệ thống kích từ, bộ PSS do hãng khác cung cấp sao cho phân tích lựa chọn được mô hình AVR và các thông số phù hợp với đối tượng thực tế.



**H. 12** Đồ thị công suất tác dụng đối với đáp ứng xung tăng 9.4% độ rộng xung 100ms

**Tài liệu tham khảo**

- [1] List of major power outages, có sẵn tại [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_major\\_power\\_outages](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_major_power_outages)
- [2] Anh PTH (2017) Một phương pháp nâng cao ổn định góc rotor máy phát điện sử dụng đồng thời bộ ổn định hệ thống (PSS) và thiết bị bù ngang tĩnh (SVC). Tạp chí Khoa học & Công nghệ ĐH Thái Nguyên, số 99(11), tr. 3-8
- [3] Trung NH, Hiền NN (2018) Nghiên cứu hiệu quả của các bộ ổn định công suất cho máy phát điện đồng bộ kết nối lưới điện. Tạp chí Khoa học & Công nghệ ĐH Thái Nguyên, số 64(02), tr. 63-69
- [4] Demello FP, Concordia C (1969) Concepts of synchronous stability as affected by excitation control. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, no.4, pp. 316-329
- [5] Oai ĐT, Duy NN (2018) Một phương pháp ước lượng hệ số tắt dao động góc rotor của máy phát điện đồng bộ trong thí nghiệm PSS, Chuyên san Đo lường, Điều khiển và Tự động hóa, quyển 21, số 2, tr. 39-44
- [6] Kundur P (1994) Power System Stability And Control. McGraw-Hill, Inc., chapter 12, p. 731
- [7] Cục điều tiết điện lực (2019) Quy trình thử nghiệm và giám sát thử nghiệm ban hành kèm theo quyết định số QĐ/25-DTDL, ngày 26/3/2019