



بهبود پایداری گذرای سیستم‌های قدرت چند ماشینه AC/DC با اعمال کنترل بر فلوی توان خط HVDC

سعید محمدخانی

دانشجوی کارشناسی ارشد

دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

Saeed.Mohammadkhani@iaukhsh.ac.ir

شاهرخ شجاعیان

استاد یار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

Shojaeian@iaukhsh.ac.ir

حمیدرضا کوفیگر

استاد یار

دانشگاه اصفهان - دانشکده فنی مهندسی

Koofigar@eng.ui.ac.ir

چکیده

در این مقاله روش کنترلی برای بهبود پایداری یک سیستم AC-DC چند ماشینه پیشنهاد می‌گردد. این هدف از طریق کنترل فلوی توان در خط DC انجام شده. برای کنترل فلوی توان در خط DC نیز از سیگنال‌های کنترل اضافی، دریافتی از سیستم AC استفاده می‌شود. مدل ماشینه‌ها برای شبیه‌سازی‌های این مقاله از مرتبه ۸ بوده و از مدل تابع تبدیل برای نمایش رفتار خط HVDC استفاده می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی کارآمدی بالای روش پیشنهادی را بر افزایش پایداری سیستم قدرت نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: پایداری گذرا، سیستم قدرت چند ماشینه، HVDC، سیگنال کنترل اضافی

۱- مقدمه

سیستم‌های انتقال جریان مستقیم فشار قوی دارای مزایای زیادی می‌باشند که یکی از آنها کنترل سریع توان انتقالی است. این توان می‌تواند با توجه به نیاز سیستم AC به سرعت تغییر کند. بنابراین سیستم‌های DC می‌توانند تاثیر مهمی بر میرا نمودن نوسانات گذرا و بهبود پایداری سیستم‌های قدرت داشته باشند. سیستم‌های انتقال HVDC دارای کنترل پذیری بالایی هستند. از این قابلیت می‌توان برای بهبود پایداری گذرا در سیستم‌های AC استفاده نمود.

تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص تاثیر سیستم HVDC بر بهبود پایداری سیستم قدرت AC انجام شده است. تقریباً در تمامی این تحقیقات از مدل کلاسیک (مرتبه ۲) برای نمایش ژنراتور استفاده و 'E' (ولتاژ پشت راکتانس گذرا) در خلال زمان گذرا ثابت فرض شده است [۱، ۲، ۳، ۴]. در این مقاله از مدل کامل (مرتبه ۸) ماشینه برای نمایش رفتار ژنراتورهای سیستم استفاده می‌شود. در این مدل، ولتاژ شبکه و بالطبع ولتاژ لینک DC در مدت زمان گذرا ثابت نخواهد بود.

تحقیقات به عمل آمده در خصوص پایداری سیستم‌های AC-DC [۱، ۲، ۳، ۴ و ۵] نشان می‌دهد سیستم‌های HVDC برای تامین گشتاور سنکرونیزه و دمپ کافی در ژنراتورهای سیستم AC جهت افزایش پایداری این سیستم‌ها به سیگنال‌های کنترل اضافی نیازمند می‌باشند. این سیگنال‌های کنترل از سیستم AC دریافت شده و می‌توانند شامل تغییر زاویه فاز ژنراتور، انحراف سرعت ژنراتور، انحراف فرکانس، تغییر توان در خط AC موازی با لینک DC و غیره باشد [۳ و ۶]. در این مقاله تغییر اختلاف سرعت ژنراتورهای دو سمت خطی که خطا در آن واقع می‌شود، توسط یک کنترل کننده تناسبی تقویت شده و به عنوان سیگنال کنترل اضافی در سیستم DC استفاده می‌شود.

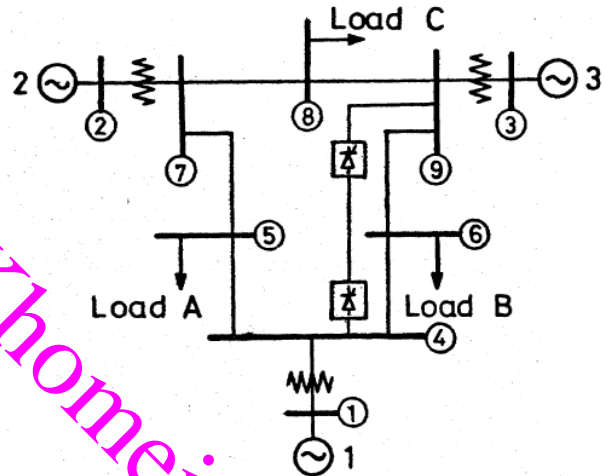
۲- توصیف سیستم مورد مطالعه

در این مقاله از یک سیستم قدرت ۹ باسه مانند شکل (۱) که دارای سه ژنراتور و یک لینک DC بین باسهای ۴ و ۹ می‌باشد، برای نشان دادن اثر خط HVDC بر پایداری گذرای یک سیستم قدرت چند ماشینه، استفاده می‌شود. مقادیر

جدول (۴) اطلاعات ژنراتورهای سیستم قدرت

	G1	G2	G3
MVA	223	192	125
V	20	18	15.5
Power factor	0.85	0.85	0.85
H	9.605	6.34	5.96
Xls (pu)	0.204	0.102	0.078
Rs (pu)	0.0016	0.0026	0.004
Xd (pu)	1.56	1.651	1.22
X'd (pu)	0.324	0.232	0.174
X''d (pu)	0.249	0.171	0.134
T'do (s)	5.14	3.9	8.97
T''do (s)	0.0437	0.033	0.033
Xq (pu)	1.548	1.59	1.16
X'q (pu)	0.918	0.38	0.25
X''q (pu)	0.249	0.171	0.134
T'qo (s)	1.5	0.535	0.5
T''qo (s)	0.141	0.078	0.07
Ka	25	25	25
Ta	0.2	0.2	0.2

پارامترهای سیستم در جداول ۱، ۲، ۳ و ۴ ارائه شده است. رفتار خط HVDC در این سیستم بصورت دو بار الکتریکی در باسهای ۴ و ۹ در نظر گرفته می‌شود که در باس ۴ (سمت رکتیفایر) توان اکتیو و راکتیو جذب و در باس ۹ (سمت اینورتر) توان راکتیو مصرف و توان اکتیو به باس تزریق می‌نماید. ژنراتور ۱ نیز مجهز به پایدار ساز سیستم قدرت می‌باشد.



شکل (۱) دیاگرام تک خطی سیستم قدرت به ماشین، نه باسه

۱-۲- مدل سیستم DC

۱-۱-۲- معادلات لینک DC در حالت ماندگار

معادلات توصیف کننده رفتار لینک DC در حالت ماندگار در مراجع مختلفی [۳، ۴، ۷ و ۸] ارائه گردیده و عبارتند از:

$$V_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_r |V_{tr}| \cos \alpha_r - \frac{3}{\pi} X_{cr} I_{dc} \quad (1)$$

$$V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_i |V_{ti}| \cos \gamma_i - \frac{3}{\pi} X_{ci} I_{dc} \quad (2)$$

$$V_{dr} = V_{di} + R_{dc} I_{dc} \quad (3)$$

$$P_r = V_{dr} I_{dc} \quad (4)$$

$$P_i = V_{di} I_{dc} \quad (5)$$

$$S_r = K \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_r |V_{tr}| I_{dc} \quad (6)$$

$$S_i = K \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_i |V_{ti}| I_{dc} \quad (7)$$

$$Q_r = \sqrt{S_r^2 - P_r^2} \quad (8)$$

$$Q_i = \sqrt{S_i^2 - P_i^2} \quad (9)$$

جدول (۱) اطلاعات خطوط سیستم قدرت

شماره خط	شماره باسهای دو سمت خط	مقاومت (pu)	راکتانس (pu)	سوسپتانس (pu)
1	4-5	0.010	0.085	0.088
2	4-6	0.017	0.092	0.079
3	5-7	0.032	0.161	0.153
4	6-9	0.039	0.170	0.179
5	7-8	0.0085	0.072	0.074
6	8-9	0.0119	0.1008	0.1045

جدول (۲) اطلاعات ترانسفورماتورهای سیستم قدرت

	T1	T2	T3
نسبت تبدیل (KV)	20/230	18/230	15.5/230
راکتانس (pu)	0.0675	0.0625	0.0586

جدول (۳) اطلاعات خط DC

V _{di} (pu)	I _{ref} (pu)	X _{cr} (pu)	X _{ci} (pu)	R _{dc} (pu)	T _{dc} (s)	γ (deg)	α _r (deg)
1.1525	0	0.1	0.1	0.05	0.1	16	14.67



کننده این مدل [۹] عبارتند از:

$$\frac{d\psi_q^r}{dt} = \omega_i \left[V_q^r - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_d^r + \frac{R_s}{X_{ls}} (\psi_{mq}^r - \psi_q^r) \right] \quad (15)$$

$$\frac{d\psi_d^r}{dt} = \omega_b \left[V_d^r + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q^r + \frac{R_s}{X_{ls}} (\psi_{md}^r - \psi_d^r) \right] \quad (16)$$

$$\frac{d\psi_{kq1}^r}{dt} = \omega_b \left[\frac{R_{kq1}}{X_{lkq1}} (\psi_{mq}^r - \psi_{kq1}^r) \right] \quad (17)$$

$$\frac{d\psi_{kq2}^r}{dt} = \omega_b \left[\frac{R_{kq2}}{X_{lkq2}} (\psi_{mq}^r - \psi_{kq2}^r) \right] \quad (18)$$

$$\frac{d\psi_{fd}^r}{dt} = \omega_b \left[\frac{R_{fd}}{X_{md}} E_{x_{fd}} + \frac{R_{fd}}{X_{lfd}} (\psi_{md}^r - \psi_{fd}^r) \right] \quad (19)$$

$$\frac{d\psi_{kd}^r}{dt} = \omega_b \left[\frac{R_{kd}}{X_{tkd}} (\psi_{md}^r - \psi_{kd}^r) \right] \quad (20)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_b (\omega_r - \omega_0) \quad (21)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (P_m - V_d^r I_d^r - V_q^r I_q^r) \quad (22)$$

معادله دیفرانسیل سیستم تحریک ژنراتورها نیز بصورت زیر می‌باشد:

$$\frac{d\Delta E_{x_{fd}}}{dt} = \frac{K_a (V_{ref} - |V_t|)}{T_a} - \frac{\Delta E_{x_{fd}}}{T_a} \quad (23)$$

۳- شبیه سازی

۳-۱- شرایط اولیه برای حل معادلات گذرا

برای حل معادلات گذرا و شبیه سازی سیستم لازم است ابتدا شرایط سیستم قبل از وقوع حالت گذرا که همان شرایط اولیه برای حل معادلات گذرا می‌باشند را داشته باشیم. برای این منظور ابتدا باید محاسبات پخش بار AC-DC انجام شود، سپس با استفاده از معادلات حالت ماندگار ژنراتور و مقادیر بدست آمده از محاسبات پخش بار، شرایط اولیه سیستم بدست می‌آیند. برخی از روشهای انجام پخش بار AC-DC در

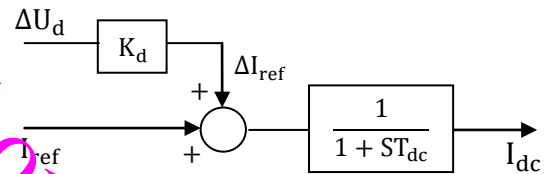
با توجه به اینکه رفتار خط HVDC بصورت دو بار الکتریکی در نظر گرفته می‌شود، ادمیتانس این دو بار عبارتند از:

$$Y_r = \frac{P_r - jQ_r}{|V_{tr}|^2} \quad (10)$$

$$Y_i = \frac{-P_i - jQ_i}{|V_{ti}|^2} \quad (11)$$

۲-۱-۲- نمایش سیستمهای HVDC در حالت گذرا

خط HVDC در مطالعات پایداری گذرا با مدل تابع تبدیل [۸ و ۱]، بصورت نشان داده شده در شکل (۲) نمایش داده می‌شود.



شکل (۲) مدل تابع تبدیل

که در این مدل ثابت زمانی T_{dc} برابر نسبت L_{dc}/R_d می‌باشد. ΔU_d سیگنال کنترل اضافی، دریافتی از سیستم AC است که از آن برای کنترل توان در خط HVDC در حالت گذرا و بهبود پایداری گذرای سیستم AC استفاده می‌شود. این سیگنال در این مقاله بصورت معادله (۲) تعریف شده و در حالت ماندگار برابر صفر است.

$$\Delta U_d = \Delta(\omega_{r1} - \omega_{r3}) \quad (12)$$

معادله (۲) با توجه به مدل تابع تبدیل بصورت زیر می‌باشد:

$$\frac{dI_{dc}}{dt} = \frac{I_{ref} + \Delta I_{ref} - I_{dc}}{T_{dc}} \quad (13)$$

۲-۲- مدل بارهای الکتریکی

در این مقاله بارهای الکتریکی با ادمیتانس ثابت و بصورت زیر نمایش داده می‌شوند.

$$Y_L = \frac{P_L - jQ_L}{|V_L|^2} \quad (14)$$

۳-۲- نمایش ژنراتور

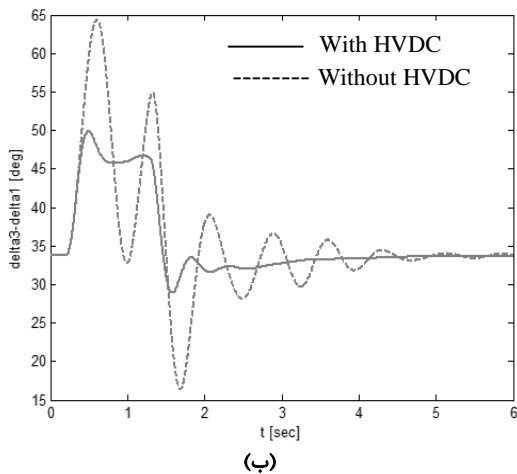
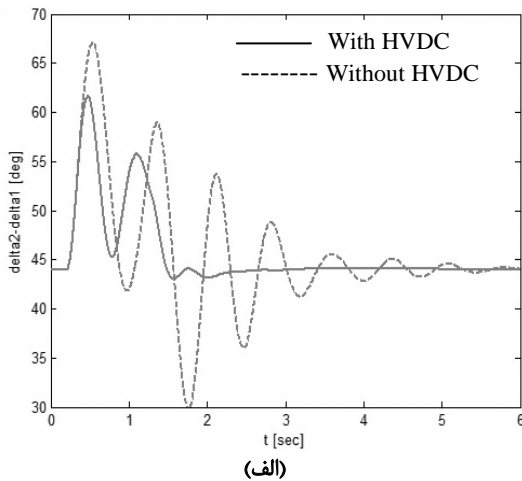
در این مقاله برای مدل نمودن ژنراتورهای سیستم از مدل مرتبه ۸ ماشین سنکرون استفاده می‌شود. معادلات توصیف

۱۱- بردن ولتاژ ترمینال ماشینها به فریم رتور
۱۲- بازگشت به مرحله ۵ در صورت به پایان نرسیدن زمان شبیه سازی

۱۳- چاپ نتایج در صورت اتمام زمان شبیه سازی

۳-۳- نتایج شبیه سازی

به منظور نشان دادن اثر لینک DC بر پایداری سیستم AC، پاسخهای سیستم با و بدون وجود لینک DC در مدار، نشان داده شده و با هم مقایسه می‌شوند. شکل (۳) تغییرات اختلاف زاویه روتور ماشینها و شکل (۴) تغییرات سرعت ماشینهای سیستم را در حالت گذرا نشان می‌دهد. به خوبی مشاهده می‌شود که با وجود خط DC در مدار و با کنترل مناسب توان این خط، میرایی نوسانات و در نتیجه پایداری سیستم قدرت به درز چشم‌گیری بهبود یافته است.



شکل (۳): اختلاف زاویه روتور ماشینها
(الف): $\delta_2 - \delta_1$, (ب): $\delta_3 - \delta_1$

مراجع [۸ و ۱۰] ارائه شده است. روش انجام شده در این مقاله به این صورت است:

- ۱- ابتدا یک پخش بار AC در سیستم انجام می‌شود.
- ۲- با استفاده از ولتاژ باسهای ۴ و ۹، بدست آمده از پخش بار AC، توانهای اکتیو و راکتیو در دو انتهای خط DC (P_i, Q_i, P_r, Q_r) محاسبه می‌شوند.
- ۳- این توانها به عنوان توانهای مصرفی دو بار الکتریکی در باسهای ۴ و ۹ (P_i با علامت منفی) وارد پخش بار AC شده و مجدداً محاسبات پخش بار AC انجام می‌گردد.
- ۴- مجدداً بند ۲ انجام شده و وارد بند ۳ می‌شویم. این کار آنقدر تکرار می‌شود تا اختلاف بین یکی از توانها (مثلاً P_r) در دو سیکل متوالی عدد بسیار کوچکی (1×10^{-12}) شود.

۲-۲- تغییرات شبکه در حالت گذرا

زمان کل شبیه سازی ۶ ثانیه می‌باشد. در زمان $t_1=0.2$ Sec خطای فاز به زمین در خط AC بین باسهای ۶ و ۹ اتفاق می‌افتد. در $t_2=0.3$ Sec خط خطا دار قطع شده و در $t_3=1.3$ Sec خط قطع شده، مجدداً وصل می‌گردد.

۳-۳- مراحل شبیه سازی

- مراحل کلی شبیه سازی عبارتند از:
 - ۱- انجام پخش بار AC-DC و تعیین توانها و ادمیتانسهای معادل خط DC و V_i و I_g برای کلیه ماشینها
 - ۲- تعیین δ همه ماشینها و سپس تعیین V_d, V_q, I_d و I_q ماشینها در فریم شبکه (سنکرون)
 - ۳- محاسبه جریان و ولتاژ ماشینها در فریم روتور هر ماشین
 - ۴- محاسبه E_{fd}, I_f و شارهای پیوندی ماشینها
 - ۵- بردن $V_d^r, V_q^r, E_{x'fd}$ و شارهای پیوندی ماشینها و I_d^{ref}, I_q^{ref} و ΔI_{ref} خط DC به معادلات دیفرانسیل سیستم AC-DC، حل این معادلات و تعیین شارهای پیوندی،
 - ۶- محاسبه توانهای اکتیو و راکتیو و ادمیتانسهای معادل جدید خط HVDC
 - ۷- محاسبه جریانهای جدید ماشینها در فریم روتور هر ماشین (I_d^r و I_q^r)
 - ۸- بردن جریان ماشینها به فریم سنکرون و محاسبه I_g ماشینها
 - ۹- تغییر در شبکه در صورت لزوم (با توجه به بخش ۳-۲)
 - ۱۰- فرستادن I_g ماشینها به درون شبکه و یافتن ولتاژ ترمینال ژنراتورها در فریم سنکرون

۴- نتیجه گیری

در این مقاله با اتکا به شبیه‌سازی‌هایی براساس مدل مرتبه ۸ ماشینهای سنکرون و پیشنهاد روش کنترلی جدیدی نشان داده شد در صورت وجود یک خط HVDC در سیستم قدرت چند ماشین به خوبی می‌توان با کنترل مناسب این خط در حالت گذرا از قابلیت تغییر سریع توان در آن، برای دمپ نوسانات و بهبود پایداری گذرای سیستم AC استفاده نمود.

۵- فهرست علائم

۵-۱- علائم سیستم DC

V_{dr} : ولتاژ DC سمت رکتیفایر

V_{di} : ولتاژ DC سمت اینورتر

V_{tr} : ولتاژ باس AC منتهی به رکتیفایر

V_{ti} : ولتاژ باس AC منتهی به اینورتر

a_r : نسبت تبدیل ترانسفورماتور بین رکتیفایر و باس AC

a_i : نسبت تبدیل ترانسفورماتور بین اینورتر و باس AC

α_r : زاویه آتش رکتیفایر

γ_i : زاویه خاموش شدن اینورتر

X_{cr} : راکتانس کموتاسیون رکتیفایر

X_{ci} : راکتانس کموتاسیون اینورتر

I_{dc} : جریان خط DC

R_{dc} : مقاومت خط DC

L_{dc} : اندوکتانس خط DC

S_r : توان مختلط رکتیفایر

S_i : توان مختلط اینورتر

P_r : توان اکتیو رکتیفایر

P_i : توان اکتیو اینورتر

Q_r : توان راکتیو رکتیفایر

Q_i : توان راکتیو اینورتر

K : یک ضریب ثابت است. $K \approx 0.995$

T_{dc} : ثابت زمانی خط DC

K_d : بهره کنترل کننده تناسبی

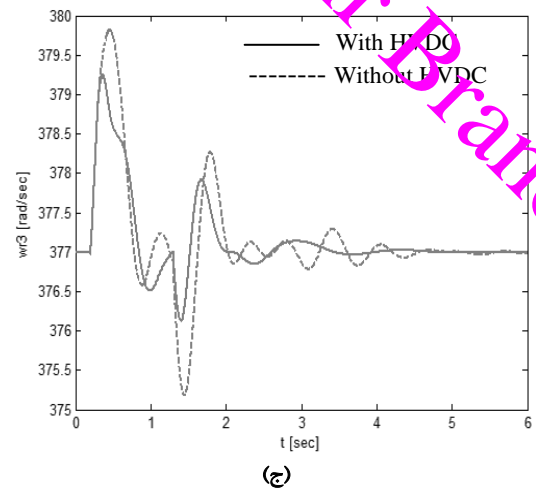
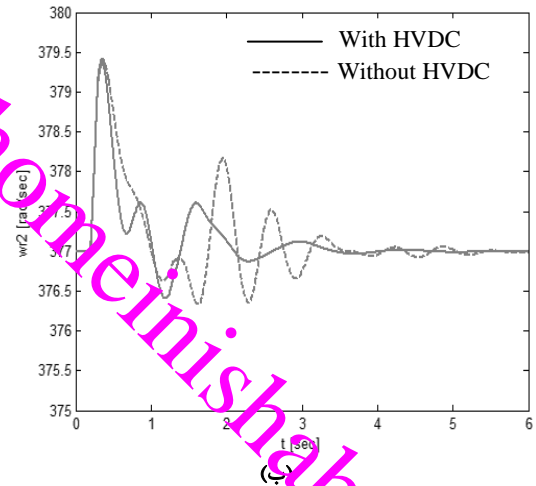
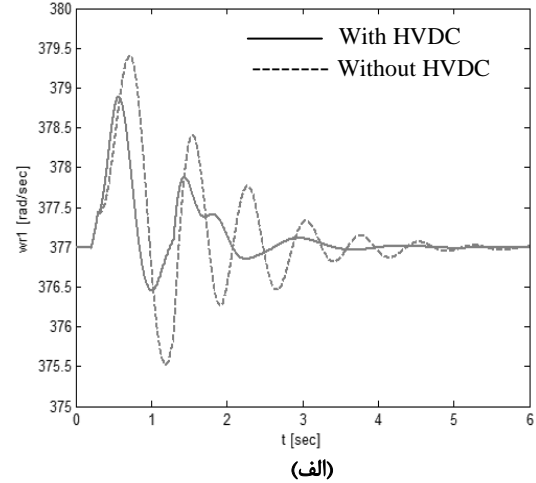
۵-۲- علائم سیستم AC

Ψ_q^r : شار پیوندی سیم پیچ استاتور در محور عرضی (محور q)

Ψ_d^r : شار پیوندی سیم پیچ استاتور در محور طولی (محور d)

Ψ_{kq1}^r : شار پیوندی سیم پیچ میرا کننده اول روتور در محور q

Ψ_{kq2}^r : شار پیوندی سیم پیچ میرا کننده دوم روتور در محور q



شکل (۴): سرعت روتور ماشینهای سنکرون
(الف): برای G1، (ب): برای G2، (ج): برای G3



۶- مراجع

- [1] M.A.Pai and K.R.Padiyar and C.Radhakrishna, "Transient Stability Analysis of Multi-Machine AC/DC Power Systems Via Energy Function Method", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 12, December 1981.
- [2] G.M.Huang, "HVDC Controls for Power System Stability", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 2002.
- [3] U.Vanim and R.Rao, "Damping Effects of Supplementary Control Signals for Enhancement of Transient Stability in AC-DC Power Systems", International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(7), 2010,3084-3092.
- [4] I.Kulkarni and S.Dash, "Development of a Neural Network Based HVDC Controller for Transient Stability Enhancement of AC/DC System", IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, March 2012.
- [5] Abu.H.M.A.Rahim and Edwin P.Nowicki, "A Robust Damping Controller For An HVAC-DC System Using A Loop-Shaping Procedure", Journal of Electrical Engineering, Vol. 56, No. 1-2, 2005, 15-20.
- [6] K.R.Padiyar and M.A.Pai and C.Radhakrishna, "A Versatile System Model for The Dynamic Stability Analysis of Power Systems Including HVDC Links", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, April 1981.
- [7] P. Kundur, "Power System Stability and Control", Mc Graw-Hill, Inc., 1994.
- [8] K.R.Padiyar, "HVDC Power Transmission Systems Technology and System Interactions", New Age International Limited Publishers, 1990.
- [9] P.C.Krause, O.Wasynczuk, S.D.Sudhoff, "Analysis of Electric Machinery and Drive Systems", 2nd Edition, New York, Wiley-IEEE, 2002.
- [10] T.Smed and G.Andersson and G.B.Sheble and L.L.Gringsby, "A New Approach to AC/DC Power Flow", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991.

- Ψ_{fd}^r : شار پیوندی سیم پیچ تحریک در محور d
 Ψ_{kd}^r : شار پیوندی سیم پیچ میراکننده روتور در محور d
 Ψ_{mq}^r : شار پیوندی مغناطیس کننده در محور q
 Ψ_{md}^r : شار پیوندی مغناطیس کننده در محور d
 δ : زاویه روتور ژنراتور
 ω_r : سرعت زاویه‌ای روتور
 ω_0 : سرعت زاویه‌ای روتور در حالت ماندگار
 V_d^r : ولتاژ محور d ژنراتور در دستگاه مرجع روتور
 V_q^r : ولتاژ محور q ژنراتور در دستگاه مرجع روتور
 I_d^r : جریان محور d ژنراتور در دستگاه مرجع روتور
 I_q^r : جریان محور q ژنراتور در دستگاه مرجع روتور
 E_{xtd} : ولتاژ تحریک ژنراتور
 V_{ref} : ولتاژ مرجع سیستم تحریک ژنراتور
 T_a : ثابت زمانی سیستم تحریک ژنراتور
 K_a : ضریب بهره سیستم تحریک ژنراتور
 X_d : راکتانس محور d ژنراتور
 X_q : راکتانس محور q ژنراتور
 X'_d : راکتانس گذرای محور d ژنراتور
 X'_q : راکتانس گذرای محور q ژنراتور
 X''_d : راکتانس زیر گذرای محور d ژنراتور
 X''_q : راکتانس زیر گذرای محور q ژنراتور
 X_{ls} : راکتانس نشتی سیم پیچ استاتور
 R_s : مقاومت سیم پیچ استاتور
 X_{lkq1} : راکتانس سیم پیچ میرا کننده اول روتور در محور q
 X_{lkq2} : راکتانس سیم پیچ میرا کننده دوم روتور در محور q
 R_{Kq1} : مقاومت سیم پیچ میرا کننده اول روتور در محور q
 R_{Kq2} : مقاومت سیم پیچ میرا کننده دوم روتور در محور q
 X_{lfd} : راکتانس سیم پیچ تحریک
 X_{lkd} : راکتانس سیم پیچ میرا کننده روتور در محور d
 R_{fd} : مقاومت سیم پیچ تحریک
 R_{kd} : مقاومت سیم پیچ میرا کننده روتور در محور d
 T'_{do} : ثابت زمانی مدار باز محور d
 T'_{qo} : ثابت زمانی مدار باز محور q
 T''_{do} : ثابت زمانی زیر گذرای مدار باز محور d
 T''_{qo} : ثابت زمانی زیر گذرای مدار باز محور q