

تحلیل پایداری ولتاژ و توان در حالت‌های مختلف کنترلی

یک سیستم تک‌تزریقه HVDC^۱

محمدرضا میرسپاسی (کارشناس ارشد)

عباس شولانی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه علم و صنعت ایران

در نوشتار حاضر، پایداری ولتاژ و توان سیستم‌های تک‌تزریقه HVDC با استفاده از آنالیز حساسیت متغیرهای سیستم نسبت به متغیرهای کنترلی و با فرضیات شبه حالت استاتیکی^۲ بررسی و تحلیلی نظری شده است. بدین منظور، از مدل ساده‌ی بصرمبنای کمیات فرکانس اصلی استفاده شده و معادلات عدم تطابق پخش توان حول نقطه‌ی کار سیستم خطی شده‌اند. سپس از دو روش «شاخص پایداری ولتاژ»^۳ (VSF) و مفهوم «حداکثر توان قابل انتقال»^۴ (MAP)، حدود و حواشی پایداری با استفاده از ماتریس‌های ژاکوبی محاسبه شده‌اند. تحلیل در سه حالت کنترلی مختلف انجام و نتایج مقایسه شده‌اند. همچنین، حدود و شاخص‌های پایداری برحسب پارامترها و کمیات سیستم به دست آمده‌اند. شبیه‌سازی‌های دینامیکی نیز به منظور مطالعه‌ی پایداری ولتاژ و توان تحت تغییرات نقطه کار (تغییرات بارگذاری سیستم) برای دو شبکه‌ی ضعیف و قوی AC در سمت اینورتری لینک DC (با SCR^۵ کم و زیاد)، با استفاده از شبیه‌ساز PSCAD/EMTDC به انجام رسیده و نتایج نشان داده شده‌اند. همچنین، تحلیل پایداری ولتاژ و توان در حالت کنترلی توان ثابت / زاویه‌ی خاموشی ثابت با در نظر گرفتن دینامیک‌های کنترل‌کننده‌ها بررسی و نتایج شبیه‌سازی مطالعه شده است.

مقدمه

سنکرون یا جبران‌سازهای استاتیکی (انواع SVCها) در شینهای AC یک روش مؤثر ولی پرهزینه است. راه حل دیگر، انتخاب مناسب‌ترین راهکار کنترلی برای سیستم HVDC است که روشی کم‌هزینه و با قابلیت اعتماد بالاتر به حساب می‌آید. امروزه، یافتن بهترین روش کنترلی برای سیستم HVDC، اکثر مطالعات و تحقیقات را در زمینه‌ی بهبود عملکرد دینامیکی سیستم و افزایش حواشی پایداری آن به‌خود اختصاص داده است.^[۱،۳]

در این نوشتار، یک تحلیل اساسی از پایداری ولتاژ و توان سیستم‌های HVDC براساس فرضیات شبه حالت استاتیکی و با کمک آنالیز حساسیت ارائه شده است. حواشی پایداری ولتاژ و توان برای سیستم‌های AC با SCR متفاوت در حالت‌های مختلف کنترلی محاسبه و مقایسه شده‌اند. این تحلیل از روش شاخص پایداری ولتاژ^[۳] و مفهوم حداکثر توان قابل انتقال^[۴] انجام شده و نتایج شبیه‌سازی نیز به دلیل تصدیق موضوعیت نظری تحلیل‌ها نشان داده شده‌اند. همچنین، پایداری در حالت کنترلی توان / زاویه‌ی خاموشی ثابت با در نظرگیری دینامیک‌های کنترل‌کننده‌ها، بررسی و نتایج شبیه‌سازی بحث شده است.

مدل سیستم

تحلیل پایداری ولتاژ و توان در سیستم HVDC تک‌تزریقه با

سیستم‌های انتقال انرژی الکتریکی در نوع جریان مستقیم با ولتاژ بالا (HVDC) در بسیاری جنبه‌ها از سیستم‌های انتقال AC متفاوت‌اند. اولاً کنترل‌کننده‌های سیستم HVDC امکان کنترل توان انتقالی را در مقدار دلخواه فراهم می‌کنند که این امکان مدولاسیون توان، کنترل فرکانس و نیز افزایش حاشیه‌ی پایداری شبکه‌های AC متصل را ممکن می‌سازد. ثانیاً هر سیستم HVDC با پدیده‌های دینامیکی مختلفی در تعامل است که در هنگام طراحی و برنامه‌ریزی سیستم باید ملاحظه و بررسی شوند. مهم‌ترین این پدیده‌ها عبارت‌اند از: اضافه‌ولتاژهای موقتی، تشدید در فرکانس‌های پایین، خطر ناپایداری ولتاژ و توان، ناپایداری اشباع هسته و خطاهای مبادله.^[۲،۴] آنچه مهم است، تأثیر قاطع مشخصه‌های شبکه‌ی AC روی همه‌ی این پدیده‌هاست. از این‌رو، حداکثر توان قابل انتقال توسط اتصال DC از نقطه نظر پایداری به امیدانس شبکه‌ی AC وابسته است. البته، بسیاری از مشخصه‌های سیستم HVDC نیز در پایداری ولتاژ شبکه‌ی AC نقش دارند.

با این همه، اگر شبکه‌ی AC متصل به پایانه‌ی اینورتری ضعیف باشد (دارای SCR کوچک‌تر از ۲/۵ باشد) پایداری ولتاژ AC به یک مشکل عمده در عملکرد سیستم HVDC بدل می‌شود. به منظور رفع این مشکل، قوی کردن شبکه‌ی AC یعنی نصب کندانسورهای

$$ESCR = SCR - Q_{CN} \quad (3)$$

کل نرخ MVAR فیلترهای AC و خازن‌های شنت است که در پایه‌ی توان dc نامی پریونیت شده است. لازم به ذکر است که برای شبکه‌ی AC ضعیف اینورتری مقدار SCR کوچک‌تر از ۲/۵ فرض می‌شود.^[۷]

مدل‌سازی ریاضی سیستم

برای یافتن مدل ریاضی سیستم ساده شده‌ی شکل ۱ از طریق معادلات عدم تطابق پخش توان، باید روابط کمی توان‌های کنشی و واکنشی تزریق شده به (از) شین AC اینورتری به دست آیند که عبارت‌اند از:^[۶ و ۱۰]

$$U_{dc} = U \cos \gamma / \tau - d_x I_{dc} \tau \quad (4)$$

$$Q_c = B_c U^2 \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_{dc} = U^2 \tau (\cos \gamma - \cos \gamma \mu) / \Delta d_x \tau^2 \\ Q_{dc} = U^2 \tau (\gamma \mu + \sin \gamma - \sin \gamma \mu) / \Delta d_x \tau^2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_{ac} = [U^2 \cos \theta - U E \cos(\delta + \theta)] / |Z| \\ Q_{ac} = [U^2 \sin \theta - U E \sin(\delta + \theta)] / |Z| - B_c U^2 \end{cases} \quad (7)$$

پارامترها و متغیرهای استفاده شده در روابط فوق روی شکل ۱ معرفی شده‌اند. τ ضریبی است که ولتاژ dc را وقتی I_{dc} و U یک پریونیت باشند معادل $1/0. p.u.$ می‌کند تا شرایط نقطه کار اسمی سیستم ایجاد شود. همچنین، افت ولتاژ القایی dc برای مبدل اینورتری با رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود:

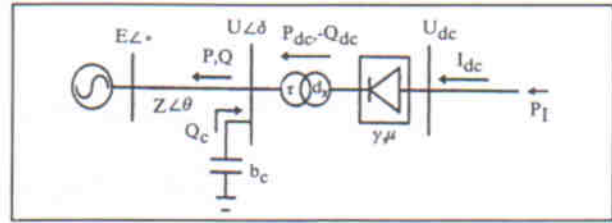
$$d_x = \frac{X_c I_{dN}}{\sqrt{2} \left[\frac{U_N}{\tau_N} \right]} \quad (8)$$

متغیرهای حالت و متغیرهای کنترلی با دو بردار \bar{x} و \bar{u} به صورت زیر تفکیک می‌شوند:^[۶ و ۱۱]

$$\begin{cases} \bar{x} = (U, \delta, I_{dc})' \\ \bar{u} = (P, Q, E, B_c, \gamma, \tau)' \end{cases} \quad (9)$$

قابل فهم است که متغیرهای حالت فوق منحصر به فرد نبوده و تنها برای سادگی محاسبات پایداری این انتخاب صورت گرفته است. متغیرهای کنترلی P, Q ، میزان تزریق توان‌های کنشی و واکنشی را به شین اصلی نشان می‌دهند.

معادلات عدم تطابق پخش توان^۷ در هر دو سمت DC و AC به



شکل ۱. مدل ساده شده‌ی اتصال DC و سیستم AC در سمت اینورتری آرایش تک‌تزریقه.

شبکه‌ی AC ضعیف در سمت اینورتری، با استفاده از مدل ساده شده در شکل ۱ انجام می‌شود. از آنجا که هدف، مطالعه‌ی پایداری در سمت اینورتر است می‌توان نسبت اتصال کوتاه سمت یکسوساز را نسبتاً بزرگ فرض کرد تا بی‌تأثیر شود.

از این مدل در مقالات مختلفی برای مطالعه‌ی پدیده‌های دینامیکی در یک سیستم AC/DC استفاده شده است^[۸-۶] که به دلیل وجود تنها یک اتصال DC متصل به شبکه‌ی AC به نام سیستم تک‌تزریقه‌ی HVDC شناخته می‌شود.^[۹] آرایش اتصال به صورت نقطه به نقطه بوده و شبکه‌ی AC با معادل تونن (منبع ولتاژ و امپدانس) مدل می‌شود. ثابت ماندن ولتاژ شبکه‌ی AC (E) در طول تحلیل یک شرط اساسی است. برای محاسبه‌ی امپدانس معادل شبکه‌ی AC، ماشین‌های سنکرون با مقادیر راکتانس گذرا $[X'_d]$ معرفی شده و فرکانس سیستم AC ثابت فرض می‌شود.^[۱۱]

نسبت ظرفیت اتصال کوتاه سه فازه‌ی متقارن در شین AC اینورتری (S_{AC}) به توان DC نامی (P_{dcn}) را، که معمولاً به عنوان کمیته‌ی برای محاسبه‌ی قوت شبکه‌ی AC به کار می‌رود، نسبت اتصال کوتاه می‌نامند.^[۱۱] این نسبت از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$SCR = \frac{S_{AC}}{P_{dcn}} \quad (1)$$

اگر ولتاژ نامی شین AC (U_N) به عنوان ولتاژ پایه در سمت AC و توان DC نامی (P_{dcn}) به عنوان MVA پایه‌ی سیستم فرض شوند، رابطه‌ی ۱ به صورت رابطه‌ی ۲ ساده می‌شود:^[۹]

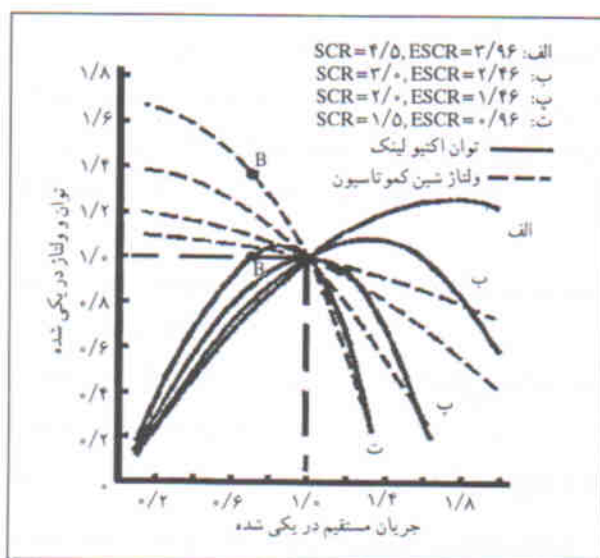
$$SCR = \frac{U_N^2}{Z} \times \frac{1}{P_{dcn}} = \frac{1}{Z_{p.u.}} \quad (2)$$

که $Z_{p.u.}$ امپدانس پریونیت شده‌ی شبکه AC معادل است. اگر تأثیر جبران‌سازهای شانت خازنی و فیلترهای AC که در شین AC اینورتری متصل می‌شوند نیز به حساب آید، نسبت اتصال کوتاه به نسبت مؤثر اتصال کوتاه (ESCR) تغییر نام داده و از رابطه‌ی ۳ قابل محاسبه است:^[۸]

مقدار شاخص در نقطه‌ی کار محاسبه شده و نیز الگوریتمی برای محاسبه‌ی آن ارائه شده است.^[۱۲]

پس از حل معادلات پخش توان، مقدار عددی VSF از رابطه‌ی فوق قابل محاسبه است که اگر عددی مثبت باشد بیانگر عملکردی پایدار است. پرواضح است که هرچه شاخص پایداری و لتاژ (VSF) بزرگتر باشد تغییرات و لتاژ نسبت به تزریق توان واکنشی شدیدتر خواهد بود و حاشیه‌ی پایداری کوچک‌تر می‌شود. بنابراین، حد پایداری و لتاژ بی‌نهایت است و برای همه VSF‌های منفی، عملکرد ناپایدار خواهد بود.

شکل ۲، تغییرات و لتاژ شین AC اینورتری و توان انتقالی dc را با افزایش جریان dc نشان می‌دهد. شرایط کاری سیستم شکل ۱ در نقطه‌ی $U_{dc}=I_{dc}=U=1/0$ p.u تنظیم شده و یکسوساز در حالت کنترلی جریان ثابت و اینورتر در حالت کنترلی زاویه خاموشی ثابت است. راکتانس کموتاسیون $0/15$ پرینیت و زاویه خاموشی 18 درجه فرض شده‌اند. واضح است که هرچه شبکه‌ی AC ضعیف‌تر باشد (یعنی SCR کوچک‌تری داشته باشد) نقطه‌ی اوج پوش به نقطه‌ی کار نزدیک‌تر و حاشیه‌ی پایداری کوچک‌تر خواهد بود. در پوش (پ) که SCR شبکه ۲ است، نقطه‌ی کار و اوج پوش بر هم منطبق‌اند که این بحرانی بودن نسبت اتصال کوتاه (CSCR) و حد پایداری را تعیین می‌کند. بنابراین، در پوش (ت) که SCR شبکه از CSCR کوچک‌تر است نقطه‌ی کار بعد از MAP قرار گرفته و شرایط کاملاً ناپایدار است. اما در پوش (الف) سیستم حاشیه پایداری بزرگی داشته و توان قابل افزایش است.



شکل ۲. منحنی تغییرات P_{dc} و U_{dc} نسبت به I_{dc} در سیستم شکل ۱.

صورت توابعی از متغیرهای حالت و کنترلی قابل محاسبه‌اند:

$$\begin{cases} \Delta P_{dc} = P_l - P_{dc} = f_1(\bar{x}, \bar{u}) \\ \Delta P_{ac} = P_{dc} - P_{ac} = f_2(\bar{x}, \bar{u}) \\ \Delta Q_{ac} = Q_c - Q_{ac} - Q_{dc} = f_3(\bar{x}, \bar{u}) \end{cases} \quad (10)$$

نقطه یا نقاط تعادل از حل معادله‌ی ماتریسی زیر حاصل می‌آیند:

$$\begin{cases} \bar{f}(\bar{x}, \bar{u}) = (f_1, f_2, f_3)' \\ \bar{f}'(\bar{x}, \bar{u}) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

از این رو هر نقطه‌ی کار سیستم شکل ۱ باید در معادله‌ی ۱۱ صدق کند که آن نقطه را با (\bar{x}_e, \bar{u}_e) نشان می‌دهند. برای تغییرات کوچک $(\Delta \bar{x}, \Delta \bar{u})$ حول نقطه‌ی کار، رابطه‌ی خطی شده‌ی ۱۱ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\left. \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{x}} \right|_{\bar{x}_e, \bar{u}_e} \Delta \bar{x} + \left. \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{u}} \right|_{\bar{x}_e, \bar{u}_e} \Delta \bar{u} = 0 \quad (12)$$

که $\frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{x}}$ و $\frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{u}}$ به ترتیب ماتریس‌های ژاکوبی G_x و G_u هستند که در نقطه کار محاسبه می‌شوند. بدین وسیله تحلیل حساسیت متغیرهای سیستم و محاسبه تغییرات آنها نسبت به یکدیگر امکان‌پذیر می‌شود.

مفهوم حداکثر توان قابل انتقال (MAP) و شاخص پایداری و لتاژ (VSF)

به منظور تحلیل پایداری توان و لتاژ سیستم شکل ۱ براساس فرضیات شبه حالت استاتیکی دو روش اساسی ارائه شده است.

روش اول، به معیار «نقطه‌ی اوج پوش» (MAP) مشهور است که نقطه‌ی اوج تغییرات P_{dc} را با افزایش جریان dc نشان می‌دهد.^[۵] پوش حاصله، پوش توان حداکثر^A (MPC) نام دارد که فاصله‌ی نقطه کار تا نقطه اوج پوش همان حاشیه‌ی پایداری توان است. حد پایداری از رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود:

$$\frac{dP_{dc}}{dI_{dc}} = 0 \quad (13)$$

در روش دوم، از نسبت تغییرات و لتاژ شین AC اینورتری به تغییرات توان واکنشی تزریق شده به شین AC به عنوان معیاری برای پایداری و لتاژ استفاده شده است.^[۴] این شاخص از رابطه‌ی ۱۴ قابل محاسبه است:

$$VSF = \left. \frac{\Delta U}{\Delta Q} \right|_{p=p_e} \quad (14)$$

ادامه سه حالت کنترلی معمول در سیستم HVDC تعریف و شاخص‌های پایداری با فرضیات شبه استاتیکی مشخص، محاسبه و مقایسه می‌شوند. همچنین، حدود و حواشی پایداری تعریف و تعیین می‌شوند.

الف) حالت کنترلی توان ثابت در یکسوساز و حالت کنترلی زاویه خاموشی ثابت در اینورتر (CP/CEA):

با شرط $(\Delta P_{dc} = 0, \Delta \gamma = 0)$ و با فرض ثابت بودن emf شبکه AC و بانک خازنی و نیز با عدم تزریق توان اکتیو به شین اینورتری $(\Delta P = 0)$ ، تغییرات کوچک متغیرهای حالت و کنترلی حول نقطه‌ی کار با بردارهای زیر تعیین می‌شوند:

$$\begin{cases} \Delta \bar{x} = (\Delta U, \Delta \delta, \Delta I_{dc}) \\ \Delta \bar{u} = (\Delta P_1, \Delta Q, 0, 0, 0, 0) \end{cases} \quad (16)$$

سیس، با استفاده از رابطه‌ی ۱۵، روابط ۱۳ و ۱۴ به صورت رابطه‌های ۱۷ و ۱۸ محاسبه می‌شوند:

$$\Delta P_1 / \Delta I_{dc} = \frac{1}{(-G_x^{-1} G_u)_{31}} \quad (17)$$

$$\frac{\Delta U}{\Delta Q} = (-G_x^{-1} G_u)_{13} \quad (18)$$

در ماتریس‌های G_x و G_u ، تغییرات توان‌های کنشی و واکنشی dc با ولتاژ شین AC به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_{dc}}{\partial U} = 0 \\ \frac{\partial Q_{dc}}{\partial U} = \frac{\gamma}{U} (Q_{dc} - P_{dc} \tan(\gamma + \mu)) \end{cases} \quad (19)$$

ب) حالت کنترلی جریان ثابت در یکسوساز و حالت کنترلی زاویه خاموشی ثابت در اینورتر (CC/CEA):

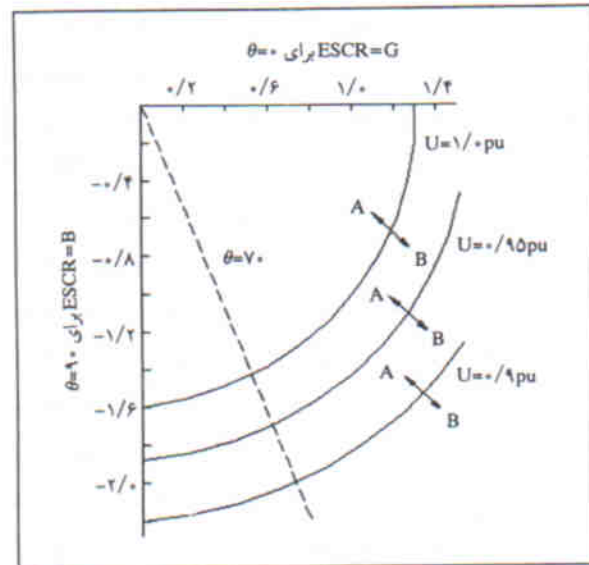
در این حالت نیز، با شرط $(\Delta \gamma = 0, \Delta I_{dc} = 0)$ ، بردارهای $\Delta \bar{x}$ و $\Delta \bar{u}$ به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\begin{cases} \Delta \bar{x} = (\Delta U, \Delta \delta, 0) \\ \Delta \bar{u} = (\Delta P_1, \Delta Q, 0, 0, 0, 0) \end{cases} \quad (20)$$

با فرضیات شبه حالت مانا رابطه‌ی VSF به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\Delta U}{\Delta Q} = (-G_x^{-1} G_u)_{13} \quad (21)$$

برای حل ماتریسی معادلات، روابط ۱۹ در این حالت به صورت زیر به دست می‌آیند:



شکل ۳. پوش‌های حداکثر توان ثابت برای ادمیتانس‌های متفاوت شبکه‌ی AC (فلش A ناحیه‌ی ناپایدار و فلش B ناحیه‌ی پایدار را نشان می‌دهد.) [۱۳]

هرچه ادمیتانس معادل شبکه‌ی AC نزدیک‌تر به مقدار متناظر بانسبت بحرانی باشد، احتمال عملکرد ناپایدار سیستم بیشتر خواهد بود. در این حالت، جریان کاری سیستم DC بالاتر از جریان نقطه‌ی اوج پوش بوده و سیستم به سمت فروپاشی ولتاژ پیش می‌رود. در شکل ۳، پوش‌های حداکثر توان ثابت (MAP=cte.) برای سه مقدار متفاوت ولتاژ در شین AC سیستم شکل ۱ نشان داده شده است. این پوش‌ها به مرزهای ادمیتانسی پایداری معروف‌اند که با تغییرات θ از صفر تا نود درجه (ادمیتانس مقاومتی تا اندوکتانسی) به دست آمده‌اند. سیستم در حالت کنترلی توان و زاویه‌ی خاموشی فرض می‌شود.

ناحیه‌ی داخلی هر پوش نشانگر ناحیه‌ی ناپایدار است. به عنوان مثال برای حالت $U=1/0$ ، اگر شبکه‌ی AC با معادل اندوکتانسی مدل شود نسبت بحرانی اتصال کوتاه حدوداً ۱/۶ خواهد بود و برای ESCRهای بزرگ‌تر از آن عملکرد سیستم پایدار است.

تحلیل شبه استاتیکی پایداری ولتاژ و توان در سیستم تک‌تزریقه‌ی HVDC

از رابطه‌ی ۱۲ که براساس فرضیات شبه استاتیکی محاسبه شد، رابطه‌ی ۱۵ به دست می‌آید:

$$\Delta \bar{x} = -G_x^{-1} G_u \Delta \bar{u} \quad (15)$$

شاخص‌های پایداری ولتاژ و توان که پیش از این معرفی شدند با فرضیات مناسبی در متغیرهای حالت و کنترلی قابل محاسبه‌اند. در

شده‌اند (ماتریس ژاکوبی J همان ماتریس رابطه‌ی ۱۵ بوده و در $P=P_0$ برای هر حالت کنترلی به دست می‌آید).

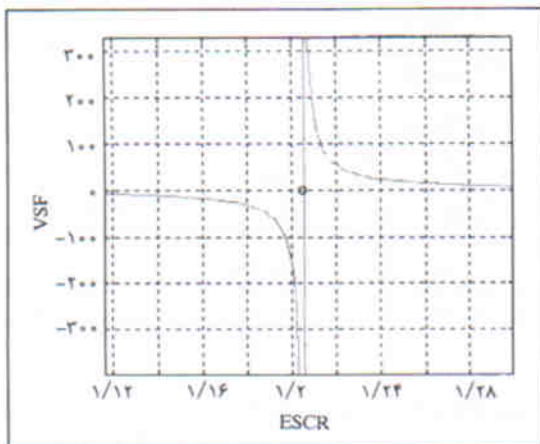
$$b = \gamma(Q_{dc} - P_{dc} \tan(\gamma + \mu))$$

$$r = \frac{\gamma U_{dc}}{\cos \gamma + \cos(\gamma + \mu)}$$

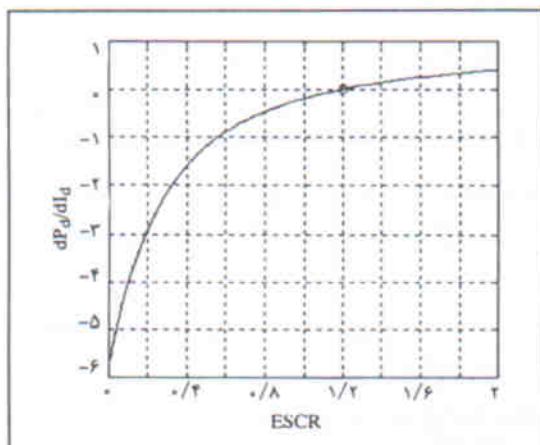
$$\det(J \Big|_{c.m}) = U^\top \text{ESCR}^\top - Q_{dc}^\top + U \frac{\partial Q_{dc}}{\partial U} \Big|_{p=p_0}$$

$$(U^\top \text{ESCR} + Q_{dc}) - P_{dc} (P_{dc} - U \frac{\partial P_{dc}}{\partial U} \Big|_{p=p_0}) \quad (27)$$

شکل‌های ۴ و ۵، تغییرات VSF و $\frac{dP_{dc}}{dI_{dc}}$ را نسبت به ESCR نشان می‌دهند. فرضیات اساسی عبارت‌اند از: $X_c = \omega / \gamma p.u.$ ، زاویه‌ی خاموشی اینورتر معادل ۱۸ درجه و $Q_{cn} = Q_{dcn} = \omega / 54 p.u.$ حالت کنترلی یکسوساز، توان ثابت و اینورتر در حالت زاویه‌ی



شکل ۴. مشخصه VSF در حالت کنترلی توان ثابت/زاویه خاموشی ثابت.



شکل ۵. مشخصه $\frac{dP_{dc}}{dI_{dc}}$ در حالت کنترلی توان ثابت/زاویه خاموشی ثابت.

$$\begin{cases} \frac{\partial P_{dc}}{\partial U} = \frac{\gamma}{U} \times \frac{P_{dc} \cos \gamma}{\cos \gamma + \cos(\gamma + \mu)} \\ \frac{\partial Q_{dc}}{\partial U} = \frac{\gamma}{U} \times \left[Q_{dc} - \frac{P_{dc} \sin(\gamma + \mu)}{\cos \gamma + \cos(\gamma + \mu)} \right] \end{cases} \quad (22)$$

(پ) حالت کنترلی توان ثابت در یکسوساز و حالت کنترلی ولتاژ dc ثابت در اینورتر (CP/Vdc):

روابط ۱۳ و ۱۴ به‌طور مشابه در این حالت نیز قابل محاسبه‌اند. روابط ۱۹ به‌صورت زیر تغییر می‌کنند:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_{dc}}{\partial U} = 0 \\ \frac{\partial Q_{dc}}{\partial U} = \frac{\gamma}{U} (Q_{dc} + P_{dc} \cot(\gamma + \mu)) \end{cases} \quad (23)$$

در حالت کلی، روابط شاخص‌های پایداری ولتاژ و توان برحسب پارامترها و متغیرهای سیستم به صورت معادلات ۲۵ و ۲۶ قابل محاسبه‌اند که شرط حد پایداری توان، صفر شدن رابطه‌ی ۲۵ بوده و حد پایداری ولتاژ در مقدار بی‌نهایت رابطه‌ی ۲۶ است. بدین وسیله نسبت بحرانی اتصال کوتاه محاسبه می‌شود:

$$CESCR = \frac{1}{U^\top} \left[-\frac{b}{\gamma} + \sqrt{\left[\frac{b}{\gamma} - Q_{dc} \right]^2 + P_{dc}^\top} \right] \quad (24)$$

که این مقدار از برآورده شدن دو رابطه‌ی ۲۵ و ۲۶ به دست آمده و حد پایداری ولتاژ و توان را نشان می‌دهد که به نوعی، دو رابطه‌ی زیرین شاخص‌های پایداری ولتاژ و توان هستند.

$$\frac{\Delta P_{dc}}{\Delta I_{dc}} =$$

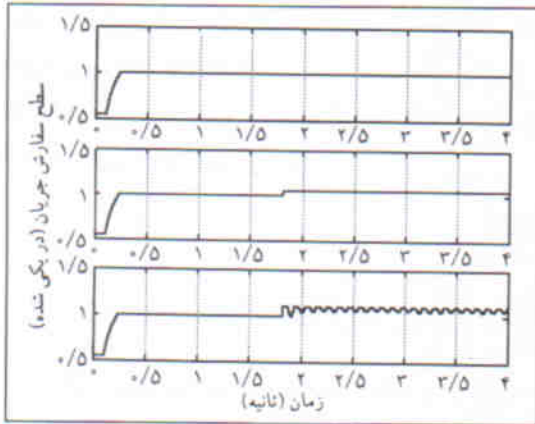
$$\frac{r U \cos(\gamma + \mu) [U^\top \text{ESCR}^\top - Q_{dc}^\top + b(U^\top \text{ESCR} + Q_{dc}) - P_{dc}^\top]}{\det(J \Big|_{\text{control mode}})} \quad (25)$$

$$VSF = \frac{\Delta U}{\Delta Q} =$$

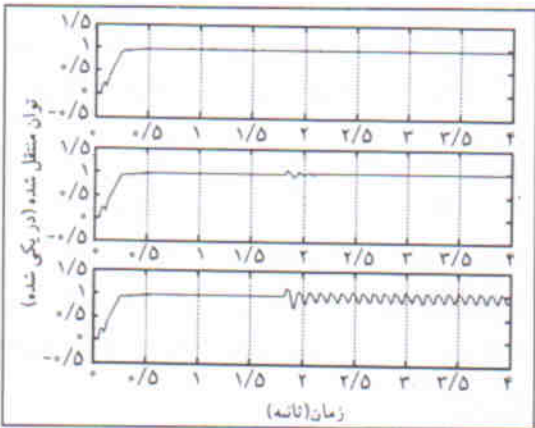
$$\frac{U^\top \text{ESCR} + Q_{dc}}{U^\top \text{ESCR}^\top - Q_{dc}^\top + U \frac{\partial Q_{dc}}{\partial U} [U^\top \text{ESCR} + Q_{dc}]} \times \frac{U^\top \text{ESCR} + Q_{dc}}{-P_{dc} \left[P_{dc} - U \frac{\partial P_{dc}}{\partial U} \right]} \quad (26)$$

مجهولات در رابطه‌ی فوق به‌صورت روابط ۲۷ آورده

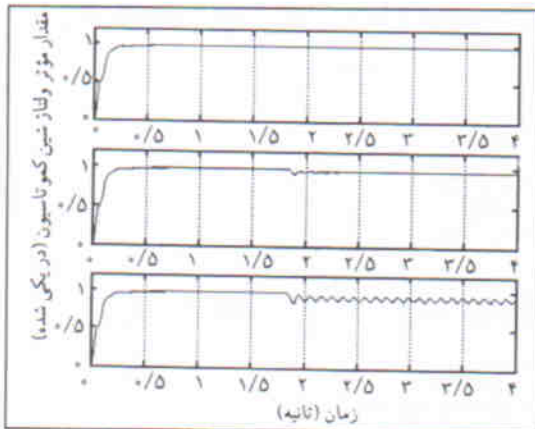
بارگذاری سیستم به اندازه‌ی ۰/۰۵ و ۰/۱ پریونیت در زمان ۱/۸ ثانیه افزایش داده شده است (شکل ۸ الف). نتایج افزایش توان درخواستی از اتصال dc در شکل (۸ ب) و مقدار موثر ولتاژ اینورتری در شین کموتاسیون در شکل (۸ ج) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از سه شکل ۸ پیداست، به دلیل ضعیف بودن سیستم در سمت اینورتر،



(الف)

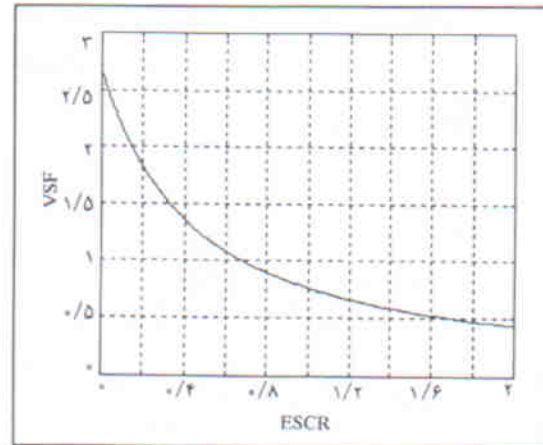


(ب)

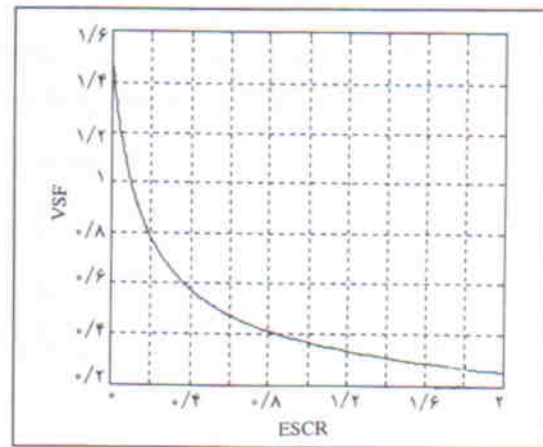


(ج)

شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی برای سیستمی ضعیف با نسبت اتصال کوتاه ۲/۵ در هر دو سوی مبدل‌ها، در هر یک از اشکال سه‌گانه فوق.



شکل ۶. مشخصه VSF در حالت کنترلی جریان ثابت/زاویه خاموشی ثابت.



شکل ۷. مشخصه VSF در حالت کنترلی توان ثابت/ولتاژ dc ثابت.

خاموشی ثابت است. مقدار CESC که حد پایداری توان را با صفر شدن مشخصه نشان می‌دهد، منطبق بر مقدار CESC از مشخصه VSF است که حد پایداری ولتاژ را تعیین می‌کند. این معادل بودن دو شرط پایداری ولتاژ و توان را در یک سیستم تک‌تزیقه HVDC تثبیت می‌کند. CESC در دو شکل حدوداً ۰/۰۵ اختلاف دارد که قابل اغماض است.

شکل‌های ۶ و ۷، مشخصه‌های VSF را برای حالت‌های کنترلی دیگر نشان می‌دهند. VSF، در هیچ یک از این دو مشخصه بی‌نهایت نمی‌شود و پایداری ولتاژ در حالت عادی حفظ شده است.

نتایج شبیه‌سازی تحلیل شبه‌استاتیکی

نتایج شبیه‌سازی برای دو حالت ضعیف و قوی شبکه‌ی AC سمت اینورتر در دو شکل ۸ و ۹ نمایش داده شده است. در شکل ۸ نسبت‌های اتصال کوتاه سمت اینورتر و یکسوساز ۲/۵ تنظیم شده‌اند و سطح جریان سفارشی در بلوک کنترلی به دلیل افزایش سطح

می‌کند نشان داده شده است. در مدل سیگنال کوچک سیستم، کنترل‌کننده ی با معادله ی زیر مدل می‌شود:

$$\Delta y = \frac{K_y \Delta U}{s T_y} \quad (28)$$

که در آن، K_y بهره و T_y ثابت زمانی کنترل‌کننده است. کنترل‌کننده ی توان در سمت یکسوساز نیز با معادله ی ۲۹ مدل می‌شود:

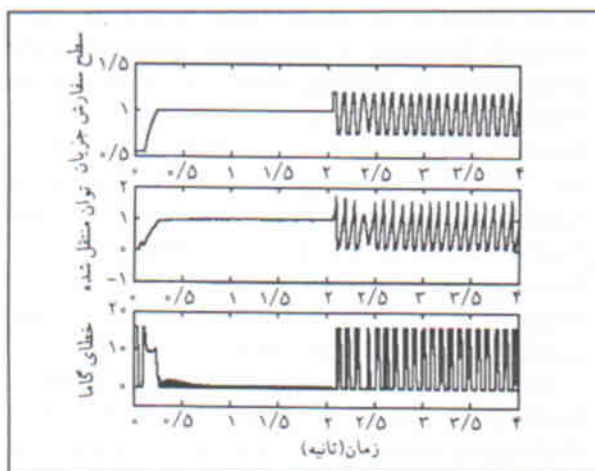
$$\Delta I_{dc} = -\frac{U_{dc}}{1+sT_p} = -\frac{K_1 \Delta U + K_2 \Delta y}{1+sT_p} \quad (29)$$

که در آن K_1 و K_2 ثابت‌هایی وابسته به نقطه ی کار و پارامترهای سیستم‌اند و T_p ثابت زمانی کنترل‌کننده ی توان است.

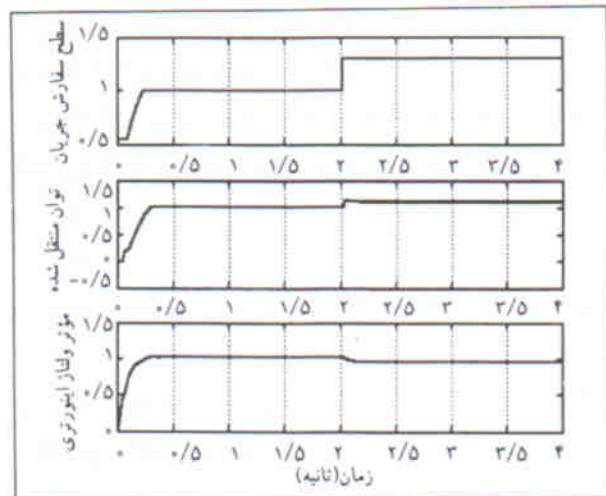
با جایگزینی دو رابطه ی فوق در معادلات شبه استاتیکی می‌توان به مقدار دینامیکی VSF دست یافت. برای یک سیستم تک تریقه ی نوعی، رابطه ی ۳۰ به دست می‌آید:

$$VSF(s) = \frac{\Delta U}{\Delta Q}(s) = \frac{A_1}{B_2 s^2 + B_1 s + B_0} \quad (30)$$

زمانی سیستم پایدار است که همه ی قطب‌های حاصله از رابطه ی فوق سمت چپ محور موهومی قرار گیرند. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است. با شبیه‌سازی یک کنترل‌کننده توان ثابت از نوع PI، مقادیر ثابت‌های زمانی دو کنترل‌کننده نسبت به یکدیگر تنظیم شده و حاشیه ی پایداری بهبود یافته است. سیستم در هر دو سمت ضعیف است ولی نسبت ثابت زمانی کنترل‌کننده زاویه خاموشی تقریباً ۱/۵ برابر ثابت زمانی در کنترل‌کننده توان است (شکل ۱۰). با افزایش توان درخواستی از سیستم (به میزان ۰/۲ پریونیت) سیستم ناپایدار شده و خطای با دامنه ی زیادی نوسان



شکل ۱۰. نتیجه ی افزایش توان درخواستی از سیستم برای $T_y = 1/5$ و نسبت اتصال کوتاه در سمت اینورتر برابر ۰/۲.



شکل ۹. نتایج شبیه‌سازی برای افزایش ۰/۳ پریونیتی جریان مرجع در سیستمی با نسبت اتصال کوتاه ۴ در سمت اینورتر.

حاشیه ی پایداری ولتاژ و توان کوچک و برای افزایش ۰/۱ پریونیت، سیستم ناپایدار شده است.

شکل ۸ الف، عملکرد سیستم در حالت عادی شکل ۸ ب، در افزایش ۰/۰۵ پریونیت جریان مرجع و شکل ۸ ج، در افزایش ۰/۱ پریونیت جریان مرجع می‌باشند.

در شکل ۹ همان نتایج برای سیستمی قوی به دست آمده و نشان داده شده است. در این حالت SCR سمت اینورتر تا مقدار ۴ افزایش داده شده و افزایش جریان بارگذاری به میزان ۰/۳ پریونیت صورت گرفته است. حاشیه ی پایداری ولتاژ و توان نسبتاً بالا بوده و سیستم علی‌رغم ۳۰٪ افزایش در سطح جریان درخواستی (یعنی سطح بارگذاری) به سرعت پایدار شده است. البته این حداکثر حاشیه ی پایداری بوده و سیستم با ۰/۳۵ پریونیت افزایش ناپایدار می‌شود.

تاثیر دینامیک‌های کنترل‌کننده‌ها روی پایداری ولتاژ و توان

تحلیل شبه استاتیکی ارائه شده با این فرض اساسی صورت گرفت که کنترل‌کننده ی جریان سیستم DC بسیار سریع‌تر از تنظیم‌کننده ی ولتاژ شبکه ی AC پاسخ می‌دهد. مسلماً، تحلیل واقع‌بینانه تر سیستم باید دینامیک‌های آن را شامل شود. برای این کار روش‌های مختلفی قابل اجراء است که تحلیل مقادیر ویژه با متغیرهای حالت دینامیکی یکی از روش‌های مطمئن به حساب می‌آید.

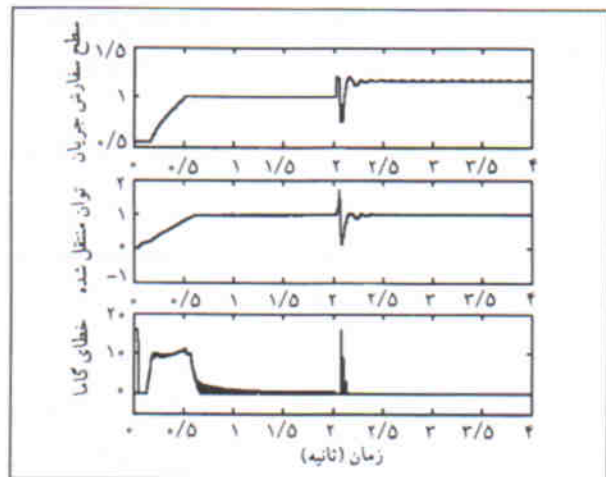
در اینجا با استفاده از مدل‌سازی متغیرهای حالت دینامیکی و تحلیل در حوزه ی زمان چگونگی بهبود شرایط پایداری در حالت کنترلی توان برای سیستمی که با ESCR کوچک‌تر از CESCR کار

اعم از استفاده از جبران‌سازهای توان راکتیو مثل SVC و STATCOM و قوی کردن شبکه‌های AC دو سمت اینورتری و یکسوکندگی، می‌توان به این نتیجه رسید که یافتن بهترین راهکار کنترلی برای سیستم dc بهترین روش در جهت بهبود حواشی و حدود پایداری به‌شمار می‌رود، زیرا هم از نظر اقتصادی و هم از بعضی جهات فنی برتر است.

بر اساس تحلیل شبه استاتیکی که ارائه شد، حالت کنترلی جریان /زاویه خاموشی بهترین حاشیه‌ی پایداری ولتاژ و توان را برای یک سیستم تک‌تزریقه‌ی HVDC دارد و برپایه‌ی تحلیل دینامیکی، حاشیه‌ی پایداری در حالت کنترلی توان ثابت /زاویه‌ی خاموشی ثابت با تنظیم صحیح پارامترهای دوکنترل‌کننده قابل بهبود است.

مسلماً برای نصب و بهره‌برداری از یک سیستم ساده‌ی HVDC (منظور همین آرایش تک‌تزریقه‌ی بررسی شده در این نوشتار است)، پایداری ولتاژ و توان در مراحل طراحی و برنامه‌ریزی باید به‌دقت مطالعه و بررسی شوند.

تحلیل پایداری ولتاژ و توان برای سیستم چندتزریقه (با چند اتصال HVDC متصل به شبکه‌های AC در سمت اینورتری) اهمیت و پیچیدگی بیشتری دارد که در نوشتار دیگری مطالعه شده است.



شکل ۱۱. نتیجه‌ی افزایش توان درخواستی از سیستم برای $T_{\gamma} = 1/0$ و نسبت اتصال کوتاه در سمت اینورتر برابر $2/5$.

داشته است. با تنظیم نسبت ثابت‌های زمانی دوکنترل‌کننده به مقدار یک، نتیجه‌ی افزایش توان در شکل ۱۱ نشان داده شده است. خطای γ به صفر رسیده و سیستم پایداری خود را حفظ کرده است.

نتیجه‌گیری

در مقایسه با دیگر راهکارهای بهبود پایداری ولتاژ و توان سیستم

پانویس

1. Single-Infeed HVDC Systems (SIF)
2. High Voltage Direct Current
3. Quasi-Static Assumptions
4. Voltage Stability (Sensitivity) Factor (VSF)
5. Maximum Available Power (MAP)
6. Short Circuit Ratio (SCR)
7. Mismatch Power Flow Equations
8. Maximum Power Curve (MPC)
9. Tap Changer
10. Hammad, A. and Taylor, C. "HVDC Controls for system dynamic performance", *IEEE Trans. On Power Systems*, 6 (2), pp 743-752 (May 1991).
11. Hammad, A. and Sadek, K. "A new approach for the analysis of and solution of DC voltage stability problems at HVDC terminals", *Proceedings of International Conference on DC power transmission*. Montreal, Canada, pp 164-170 (Jun 4-8 1984).
12. Ainsworth, J.D., Gavrilovic, A. and Thanawala, H.L. "Static and synchronous compensators for DC transmission converters connected to weak AC systems", paper 31-0 Cigre General Session, Paris, France, pp 1-11 (1980).
13. Franken, B. and Andersson, G. "Analysis of HVDC converters connected to weak AC systems", *IEEE Trans. on Power systems*, 5 (1), pp 235-242 (Feb 1990).
14. Andersson, G. and Liss, G. "Improving voltage stability in power systems with HVDC converters", *IEE International Conference on advances in power system control, Operation and Management*, Hong Kong, pp 698-703 (November 1991).
15. Smed, T. and Andersson, G. "Analysis of power/voltage stability of HVDC converters in AC systems", *Proceedings of*

منابع

1. "Guide for Planning DC Links Terminating at AC Systems Locations having Low Short-Circuit Capacities, Part I: AC/DC Interaction Phenomena", CIGRE-IEEE joint WG 14.07/15.05.05, Cigre Technical Brochure 68, Paris, France, (1991).
2. Gavrilovic, A., Peixoto, C.A.O. and Bowles, J.P. "Aspects of AC/DC system interaction: peak available power, second harmonic resonance, low inertia systems, controllability of HVDC", *IEEE Montech 86, Conference on HVDC Power Transmission*, pp 137-143, (1986).

- the IEE 5th International conference on AC and DC Transmission, London, England, (345) pp 395-397 (1991).
9. Hau Aik, D.L. and Andersson, G. "Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems", *IEEE Trans. on power delivery*, 12 (3), pp 1309-1318 (July 1997).
10. Arrillaga, J. and Smith, B. "AC/DC power system analysis", *IEE power and Energy Series, The Institution of Electrical Engineers*, (1998).
11. Padiyar, K.R., Pai, M.A. and Radhakrishna, C. "Analysis of DC link control for system stabilization", *IEE International conference*, pp 145-148 (30 nov - 3 Dec 1981).
12. Hammad, A.E. and Kuhn, W. "A computation algorithm for assessing voltage stability at AC/DC interconnections", *IEEE Trans. on power systems, PWRS-1*, (1), pp 209-216 (Feb 1986).
۱۳. میرسیاسی، محمد رضا. «تحلیل پایداری ولتاژ و توان و بررسی تأثیر مشخصه‌های بار روی حواشی پایداری در سه آرایش از سیستم‌های HVDC» پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، (اسفند ماه ۱۳۸۱).