

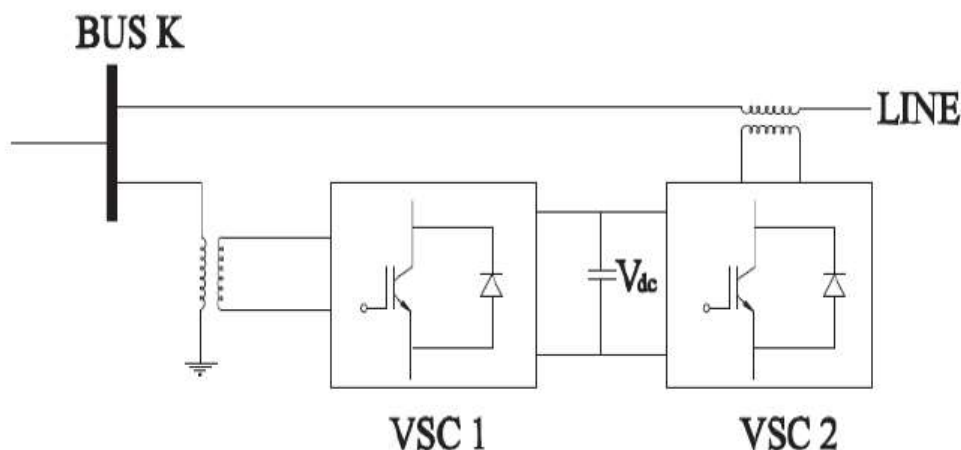
کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در کنترل ولتاژ و کنترل پخش بار در سیستم قدرت با UPFC

چکیده — کنترل ولتاژ و پایداری، جنبه‌های مهمی در عملکرد روزانه‌ی شبکه‌های سیستم‌های قدرت مدرن که همواره دارای تنش هستند، می‌باشند. کنترل کننده پخش بار یکپارچه (UPFC)، از جمله ادوات FACTS مهمی بوده که می‌تواند همزمان ولتاژ را در یک شین، و پخش بارهای اکتیو و راکتیو را از طریق خط انتقالی که به آن متصل است، کنترل کند. به منظور عملکرد پایدار سیستم قدرت، متغیرهای UPFC بایستی مطابق با شرایط بار سیستم کنترل شود. شبکه عصبی مصنوعی (ANN) ابزار مهمی است که پاسخ قابل قبولی در زمان واقعی ایجاد می‌کند. در این مقاله، یک شبکه عصبی مصنوعی پیشخور انتشار برگشتی، به منظور ارزیابی متغیرهای خروجی UPFC برای شرایط مختلف بار در یک سیستم قدرت فوق فشار قوی (EHV) ۲۴-شین در هند، توسعه یافته است.

اصطلاحات شاخص — شبکه عصبی انتشار برگشتی؛ کنترل کننده ولتاژ سری؛ کنترل کننده ولتاژ موازی؛ پایداری ولتاژ.

۱. مقدمه

UPFC از جمله ادوات FACTS مهمی بوده که می‌تواند پخش توان‌های اکتیو و راکتیو را در یک خط انتقال، کنترل کند. او همچنین می‌تواند با تزریق توان راکتیو با مقدار مناسب، ولتاژ را در یک شین کنترل کند. کنترل کننده‌ی یکپارچه‌ی پخش توان دارای دو اینورتر منبع ولتاژ بوده که از طریق یک لینک dc مشترک به هم کوپل می‌شوند. این مبدل‌ها با ترانسفورماتورهای تزویج میانی به سیستم متصل می‌گردند. دیاگرام شماتیکی UPFC را می‌توانید در شکل ۱ مشاهده کنید. یک مبدل بصورت سری با خط انتقال (VSC2) قرار گرفته و مبدل دیگر به صورت موازی به شین متصل شده است (VSC1). به منظور مطالعه‌ی اثر UPFC روی سیستم قدرت، باید آن را بطور مناسبی مدل کرد. یک مدل رایج، مدل منبع ولتاژ است که در آن UPFC به صورت دو منبع ولتاژ که یکی به صورت سری و دیگری موازی متصل شده مدل می‌گردد. شبکه‌های عصبی مصنوعی، پاسخ‌های تقریبی اما قابل قبولی را با استفاده از شبکه‌ای از واحدهای پردازش ساده که موازی با یکدیگر کار می‌کنند، ارائه می‌دهد. در این مقاله، یک شبکه عصبی انتشار برگشتی پیشخور چندلایه، توسعه داده شده تا متغیرهای خروجی مبدل سری و مبدل موازی UPFC را برای شرایط مختلف بار در سیستم قدرت، بیابد.

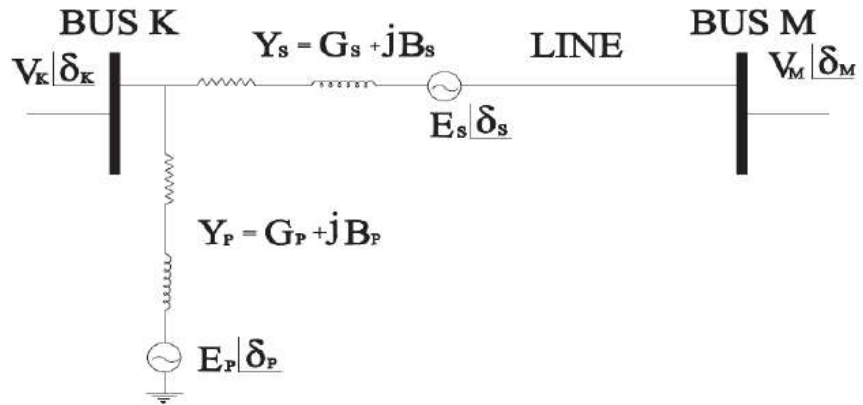


شکل ۱. دیاگرام شماتیکی UPFC

۲. اصل عملیاتی و مدل سازی UPFC

دو مبدل منبع ولتاژ UPFC که با یک لینک dc به هم متصل شده اند را می توان به صورت دو منبع ولتاژ یکی با اتصال سری و دیگری با اتصال موازی_ به صورت شکل ۲ مدل کرد. مبدل شنت UPFC به شین k متصل شده و مبدل سری، با خط انتقال به صورت سری بین شین k و شین m متصل شده است. دامنه ی ولتاژ منبع ولتاژ سری E_s و زاویه ی منبع ولتاژ سری δ_s ، قابل کنترل می باشد. زاویه δ_s می تواند بین حدود 0 و 2π تغییر کند. دامنه ی ولتاژ (E_s) نیز می تواند بین حدود مینیمم و ماکزیمم خود تغییر کند. بطور مشابه، دامنه ی ولتاژ منبع ولتاژ شنت E_p و زاویه ی منبع ولتاژ شنت δ_p نیز قابل کنترل می باشد. زاویه ولتاژ δ می تواند بین حدود 0 و 2π تغییر کند. دامنه ی ولتاژ E_p نیز می تواند بین کران های بالا و پایین حد خود، تغییر کند. پخش بار در خط انتقال k-m را می توان با کنترل ولتاژ و زاویه ی منبع ولتاژ سری، کنترل کرد. دامنه ی ولتاژ شین k را می توان با کنترل خروجی کمبده شنت، کنترل کرد.

حضور UPFC موجب چهار متغیر اضافی مانند دامنه ی منبع ولتاژ شنت E_p ، زاویه ی منبع ولتاژ شنت δ_p ، دامنه ی منبع ولتاژ سری E_s و زاویه ی منبع ولتاژ سری می گردد که باید با دیگر متغیرهای پخش بار حل شوند. معادلات پخش بار دیگر شین ها در سیستم، بجز شین های k و m، تحت تاثیر حضور UPFC قرار ندارند.



شکل ۲. مدل منبع ولتاژ UPFC

پخش توان‌های حقیقی و راکتیو در خط k-m از شین k به سمت شین m را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$P_{km} = V_k^2(G_p + G_s) - |V_k||E_p||Y_p|\cos(\delta_k - \delta_p - \theta_p) + |V_k||E_s||Y_s|\cos(\delta_k - \delta_s - \theta_s) - |V_k||V_m||Y_s|\cos(\delta_k - \delta_m - \theta_s) \quad (1)$$

$$Q_{km} = -V_k^2(B_p + B_s) + |V_k||E_p||Y_p|\sin(\delta_k - \delta_p - \theta_p) + |V_k||E_s||Y_s|\sin(\delta_k - \delta_s - \theta_s) - |V_k||V_m||Y_s|\sin(\delta_k - \delta_m - \theta_s) \quad (2)$$

با فرض عدم تلفات مبدل ها، توان اکتیو تغذیه شده به مبدل شنت P_{sh}، برابر با تقاضای توان اکتیو توسط مبدل سری P_{se} می‌باشد.

$$P_{sh} + P_{se} = 0 \quad (3)$$

که

$$P_{sh} = -G_p|E_p|^2 + |V_k||E_p||Y_p|\cos(\delta_p - \delta_k - \theta_p) \quad (4)$$

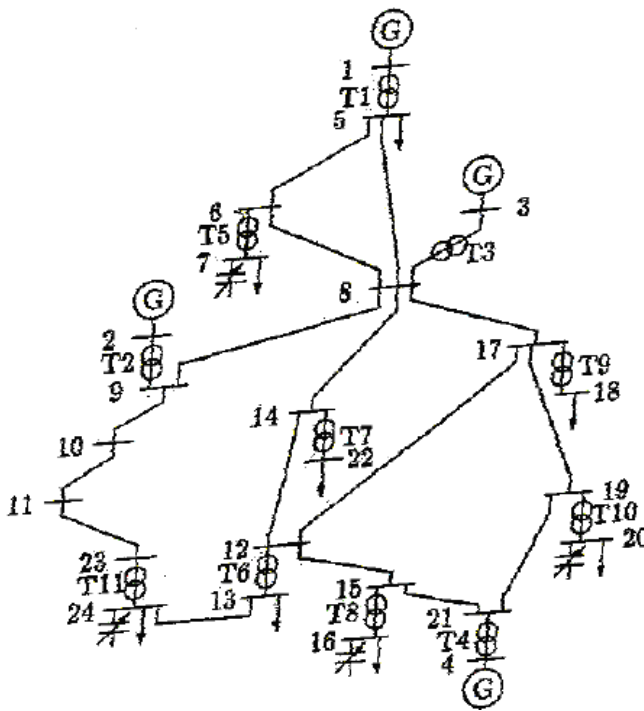
$$P_{se} = G_s|E_s|^2 + |E_s||V_k||Y_s|\cos(\delta_s - \delta_k - \theta_s) - |E_s||V_m||Y_s|\cos(\delta_s - \delta_m - \theta_s) \quad (5)$$

که θ_s زاویه Y_s و θ_p زاویه Y_p است.

خروجی کنترل کننده‌ی شنت، طوری تنظیم می‌شود که دامنه‌ی ولتاژ شین k ثابت باقی بماند. و خروجی کنترل کننده‌ی سری طوری تنظیم می‌شود تا مقدار مشخصی از پخش توان مختلط در خط انتقال اتصالی بین شین k و شین m حفظ شود. سه معادله‌ی اضافه شده (۱) و (۲) و (۳)، همراه با دیگر معادلات پخش بار

استاتیکی مربوط به بقیه‌ی شین‌ها، خطی می‌گردند. معادلات استاتیکی پخش بار مربوط به باس‌هایی که UPFC به آن متصل است نیز اصلاح می‌شود. این معادلات خطی شده، سپس با استفاده از الگوریتم نیوتون رافسون حل می‌گردند.

یک سیستم قدرت EHV ۲۴-شین در هند برای این کار در نظر گرفته شده است. دیاگرام تک-خطی سیستم قدرت ۲۴-شین در شکل ۳ نشان داده شده است. برای این سیستم ۲۴-شین، تحلیل پخش بار انجام شده و پایداری ولتاژ با استفاده از شاخص L -ارزیابی شده است تا مکان UPFC بدست آید. مشاهده شد که مقدار ماکزیمم شاخص L در شین ۲۴ است، که بیان می‌دارد شین ۲۴ از نظر پایداری ولتاژ، ضعیف‌ترین شین است. شین ۱۳ ضعیف‌ترین شین بعد از شین ۲۴ است. از این رو مبدل شنت UPFC به باس ۲۴ و مبدل سری UPFC به خط بین شین ۲۴ و شین ۱۳ متصل می‌شود.



شکل ۳. دیاگرام تک-خطی سیستم EHV ۲۴-شین

۳. معماری شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) از واحدهای پردازش ساده‌ای که موازی با هم کار می‌کنند، تشکیل شده است. این شبکه‌ها تشکیل شده از تعداد زیادی از عناصر پردازش متصل به هم، به نام نورون هستند که

با اتصالات وزندار به هم وصل شده و با هم گره خورده اند. شبکه عصبی انتشار برگشتی آموزش دیده، قادر به ارائه‌ی توصیه‌های دقیق در مدت زمان‌های کوتاه می‌باشد که آن را برای کاربردهای زمان واقعی در مراکز کنترل انرژی مناسب می‌سازد.

دو شبکه‌ی عصبی انتشار برگشتی (BPNN) توسعه و آموزش داده شده اند؛ یک BPNN برای مبدل شنت و دیگری برای مبدل سری. این شبکه‌ها با استفاده از جعبه ابزار شبکه عصبی MATLAB توسعه داده شده اند. ضریب بار، دامنه ولتاژ در شین ۲۴، پخش توان اکتیو و راکتیو در خط انتقال اتصالی بین شین ۲۴ و شین ۱۳، به عنوان ورودی در نظر گرفته شده اند. دامنه‌ی ولتاژ مبدل شنت و زاویه‌ی ولتاژ مبدل شنت، به عنوان خروجی‌های یک BNPP در نظر گرفته شده است. در BPNN دوم، دامنه‌ی ولتاژ مبدل سری و زاویه‌ی ولتاژ مبدل سری، به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. شبکه‌های عصبی توسعه یافته، دارای یک لایه ورودی با چهار گره، یک لایه‌ی خروجی با دو گره و چهار لایه‌ی پنهان می‌باشند.

الف. داده‌های آموزش ANN

داده‌های آموزش به ازای مقادیر مختلف ضریب بار، ولتاژ شین ۲۴ و پخش بار در خط ۲۴-۱۳، بدست آمده است. ضریب بار (Lm) بین ۰,۹ تا ۱,۰۵ پریونیت متغیر است. دامنه‌ی ولتاژ باس ۲۴ (V_{24}) از ۰,۹۵ تا ۱,۰۵ پریونیت - با افزایش با پله‌های ۰.02 pu - تغییر می‌کند. پخش توان حقیقی در خط انتقال (Ps) از ۰,۹ تا ۱,۰ پریونیت، با پله‌های 0.05 pu، تغییر می‌کند. پخش توان راکتیو (Qs) در خط نیز با پله‌های 0.01 pu از ۰,۰۵ تا ۰,۱ پریونیت متغیر است. تحلیل پخش بار برای ترکیب‌های مختلف این بردارهای ورودی انجام می‌شود تا خروجی‌های مبدل‌های سری و موازی را ارزیابی کند. از الگوریتم آموزش لونیبرگ-مارگارت برای آموزش شبکه‌های عصبی استفاده شده است. جدول ۱ داده‌های آموزش برای ضریب بار ۱,۰ و ولتاژ شین ۲۴ با مقدار 1.01 pu، نشان می‌دهد.

P	Q	Voltage (E_s)	Angle (δ_s)	Voltage (E_p)	Angle (δ_p)
0.9	0.05	0.2273	-116.7931	1.0133	-39.6030
	0.06	0.2273	-116.9905	1.0134	-39.6000
	0.07	0.2273	-117.1876	1.0135	-39.5971
	0.08	0.2273	-117.3844	1.0136	-39.5941
	0.09	0.2274	-117.5947	1.0137	-39.5909
	0.10	0.2274	-117.7894	1.0138	-39.5880
0.95	0.05	0.2419	-117.5577	1.0134	-40.2174
	0.06	0.2419	-117.7427	1.0135	-40.2143
	0.07	0.2419	-117.9413	1.0136	-40.2109
	0.08	0.2420	-118.1243	1.0137	-40.2079
	0.09	0.2420	-118.3070	1.0138	-40.2050
	0.10	0.2420	-118.4895	1.0139	-40.2020
1.00	0.05	0.2566	-118.2560	1.0134	-40.8359
	0.06	0.2566	-118.4425	1.0135	-40.8324
	0.07	0.2566	-118.6149	1.0136	-40.8293
	0.08	0.2567	-118.7870	1.0137	-40.8263
	0.09	0.2567	-118.9589	1.0138	-40.8232
	0.10	0.2567	-119.1380	1.0139	-40.8199

جدول ۱: داده‌های آموزش به ازای ضریب بار ۱,۰ و ولتاژ شین ۲۴ pu 1.01.

ب. بررسی اعتبار شبکه‌های عصبی انتشار برگشتی

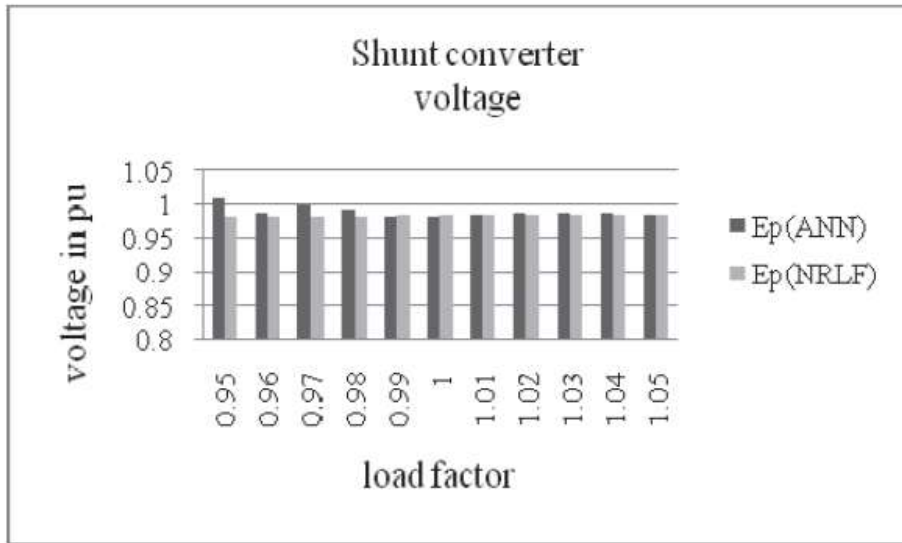
به منظور بررسی اعتبار شبکه‌های عصبی انتشار برگشتی، دو شرایط بار مختلف در نظر گرفته شده است. جدول ۲ توصیه‌های مربوط به شبکه‌های عصبی انتشار برگشتی و روش نیوتون رافسون مرسوم را به ازای ترکیب‌های مختلف برداری ورودی، نشان می‌دهد.

Input vector	Recommendation by BPNN	Recommendation by conventional NRLF method
$L_m = 0.95$ $V_{24} = 1.00$ $P_s = 0.9$ $Q_s = 0.05$	$E_s = 0.2429$ $\delta_s = -121.6733$ $E_p = 0.9988$ $\delta_p = -37.0417$	$E_s = 0.2364$ $\delta_s = -121.7176$ $E_p = 1.0041$ $\delta_p = -36.86$
$L_m = 1.00$ $V_{24} = 1.00$ $P_s = 0.9$ $Q_s = 0.06$	$E_s = 0.2266$ $\delta_s = -116.5683$ $E_p = 1.0126$ $\delta_p = -39.6258$	$E_s = 0.2273$ $\delta_s = -16.9905$ $E_p = 1.0136$ $\delta_p = -39.600$
$L_m = 1.05$ $V_{24} = 0.99$ $P_s = 0.95$ $Q_s = 0.06$	$E_s = 0.2423$ $\delta_s = -119.4846$ $E_p = 0.9941$ $\delta_p = -43.8370$	$E_s = 0.2402$ $\delta_s = -119.5660$ $E_p = 0.9949$ $\delta_p = -43.9884$
$L_m = 0.95$ $V_{24} = 1.02$ $P_s = 0.92$ $Q_s = 0.10$	$E_s = 0.2373$ $\delta_s = -118.6882$ $E_p = 1.0252$ $\delta_p = -36.5948$	$E_s = 0.2364$ $\delta_s = -117.9576$ $E_p = 1.0224$ $\delta_p = -36.5739$
$L_m = 1.00$ $V_{24} = 0.96$ $P_s = 0.9$ $Q_s = 0.06$	$E_s = 0.2513$ $\delta_s = -128.9900$ $E_p = 0.9612$ $\delta_p = -41.0107$	$E_s = 0.2436$ $\delta_s = -129.4913$ $E_p = 0.9622$ $\delta_p = -41.0107$

جدول ۲. بررسی اعتبار شبکه‌ی عصبی انتشار برگشتی

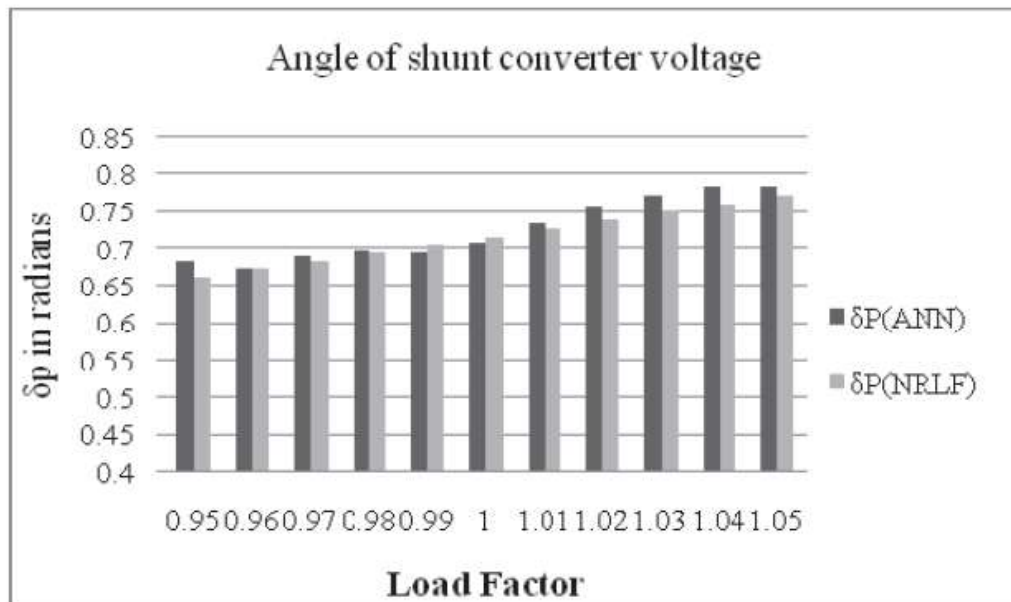
در جدول ۲ می‌توان مشاهده کرد که توصیه‌های ارایه شده با روش مرسوم (تحلیل پخش بار نیوتون-رافسون) و توصیه‌های BPNN قابل مقایسه هستند. ماکزیمم مقدار خطا در دامنه‌ی ولتاژ مبدل سری، برابر با 0.0077 pu است؛ هنگامی که ضریب بار ۱,۰۰ است، دامنه‌ی ولتاژ شین ۲۴ برابر با 0.96 pu بوده و مقدار پخش توان مختلط در خط بین شین‌های ۱۳ و ۲۴ برابر با $0.9 + j0.06$ pu است. ماکزیمم مقدار خطا در دامنه‌ی ولتاژ مبدل شنت برابر با ۰,۰۵۳ است؛ هنگامی که ضریب بار ۰,۹۵ است، ولتاژی که باید در شین ۲۴ حفظ شود، 1.00 pu و پخش توان در خط انتقال بین شین‌های ۱۳ و ۲۴ برابر با $0.9 + j0.05$ pu است.

شکل ۴ a تا d توصیه‌های شبکه‌ی عصبی انتشار برگشتی توسعه یافته و روش NRLF را به ازای ضریب بارهای مختلف نشان می‌دهد که در آن دامنه‌ی ولتاژ شین ۲۴ برابر با 0.98pu و پخش توان در خط انتقال بین شین ۱۳ و ۲۴ برابر با $0.95 + j0.1$ pu است.



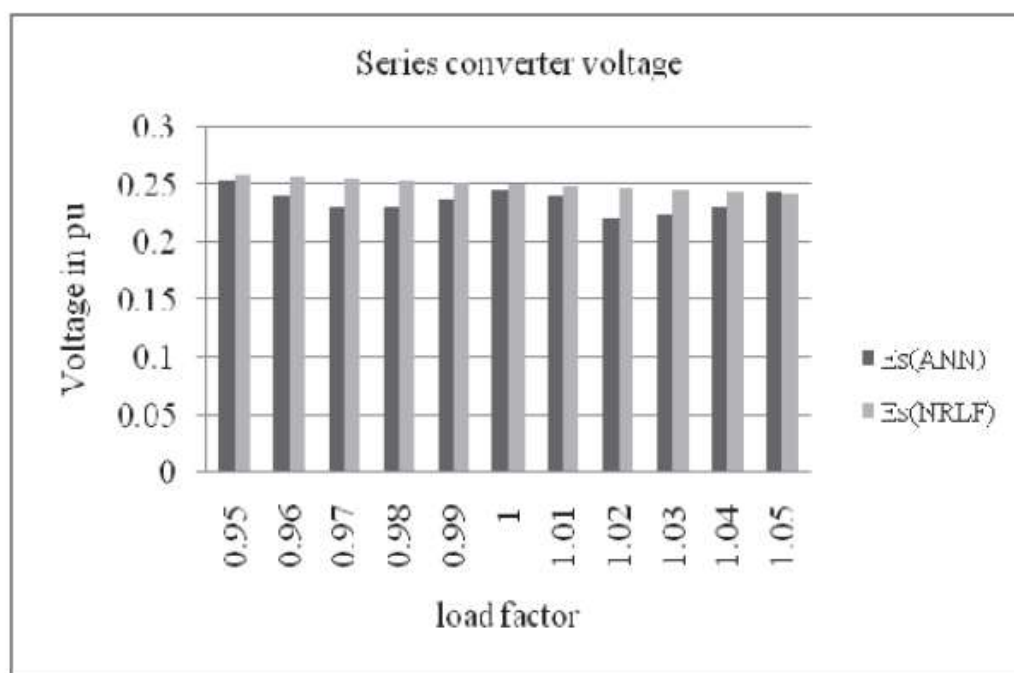
شکل ۴ a ولتاژهای توصیه شده برای مبدل شنت

در شکل ۴ a می‌توان مشاهده کرد که با در نظر گرفتن ضریب بار 0.95، ماکزیمم خطا در ولتاژ توصیه شده‌ی مبدل شنت توسط شبکه‌ی عصبی انتشار برگشتی، 0.0271 pu است. هنگامی که ضریب بار 1.05 باشد، ولتاژ توصیه شده‌ی مبدل شنت با شبکه‌ی عصبی انتشار برگشتی همانند روش NRLF مرسوم است.



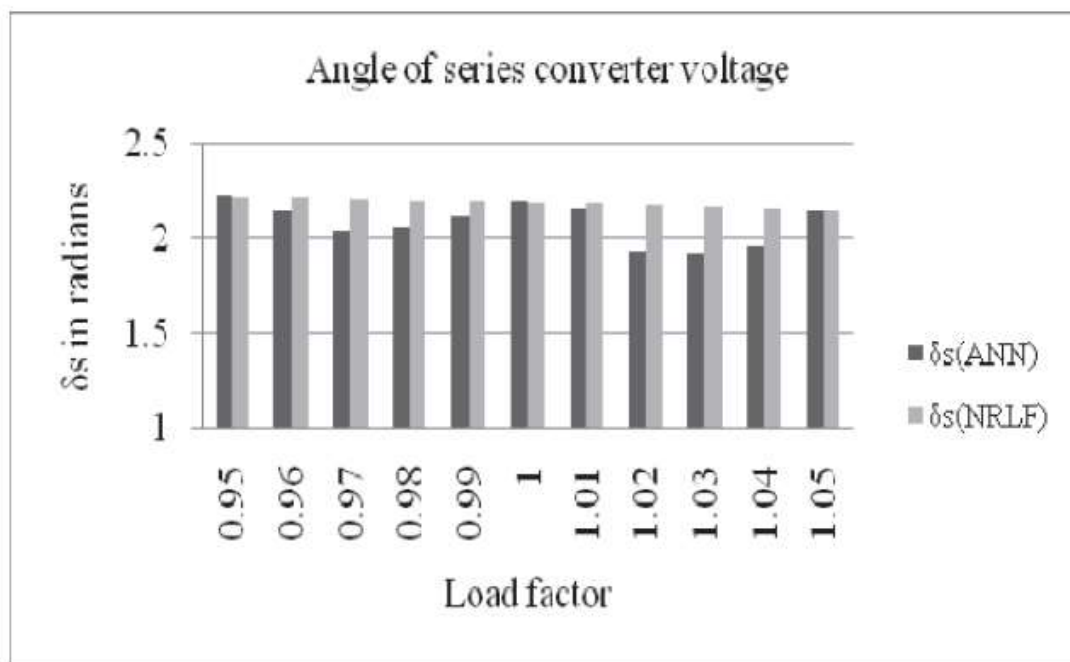
شکل ۴ b زاویه‌های توصیه شده برای ولتاژ مبدل شنت

با استفاده از شکل ۴ b می‌توان مشاهده کرد که ماکزیمم خطا در زاویه‌ی توصیه شده‌ی ولتاژ مبدل شنت توسط شبکه‌ی عصبی انتشار برگشتی، به ازای ضریب بار 1.03 برابر با 0.0217 رادیان است. ماکزیمم خطا در زاویه‌ی توصیه شده‌ی ولتاژ مبدل شنت با شبکه‌ی عصبی انتشار برگشتی توسعه یافته، با در نظر گرفتن ضریب بار 0.98، برابر با 0.0016 pu است.



شکل ۴ c ولتاژهای توصیه شده برای مبدل سری

در شکل ۴ c می‌توان مشاهده کرد که ماکزیمم خطای توصیه شده در ولتاژ مبدل سری توسط شبکه‌ی عصبی انتشار برگشتی، به ازای ضریب بار ۱,۰۲ برابر با 0.0267 pu می‌باشد. ماکزیمم خطای توصیه شده‌ی ولتاژ مبدل سری با شبکه‌ی عصبی انتشار برگشتی توسعه یافته، به ازای ضریب بار ۱,۰۵ برابر با 0.0017pu است.



شکل ۴ d. زاویه‌ی توصیه شده برای ولتاژ مبدل سری

در شکل ۴ d می‌توان مشاهده کرد هنگامی که ضریب بار ۱,۰۲ باشد، ماکزیمم خطا در زاویه‌ی توصیه شده‌ی ولتاژ مبدل سری با استفاده از شبکه‌ی عصبی انتشار برگشتی، برابر با 0.0247 رادیان است. مینیمم خطای توصیه شده برای زاویه‌ی ولتاژ مبدل سری با استفاده از شبکه‌ی عصبی انتشار برگشتی، به ازای ضریب بار 1.05 برابر با ۰,۰۰۰۷ رادیان است.

۴. نتیجه گیری

یک نمونه‌ی اولیه از ANN انتشار برگشتی برای ارزیابی متغیرهای خروجی UPFC، در این مقاله توسعه یافته است. توصیه‌های ANN، پاسخ‌های قابل قبولی را برای سیستم قدرت EHV هند که برای تحلیل‌های ما در نظر گرفته شد، نشان داده است. از این رو، شبکه‌های عصبی مصنوعی توسعه یافته را می‌توان برای اپراتورهای مراکز کنترل انرژی به عنوان یک ابزار برای کمک به پشتیبانی تصمیم‌گیری، با هدف تصمیم‌گیری در مورد تنظیمات کنترل UPFC تحت شرایط بار مختلف، بکار برد.