ارائه یک استراتژی نوین کنترلی برای جبرانساز DVR جهت بهره‌وری بیشتر از آن در کیفیت توان مصرف کننده

محمدعلی شمسی‌نژاد [۱] ، استادیار، محمدرضا خلقانی [۲]، دانشجوی کارشناسی ارشد ، محسن فرشاد [۳] ، استادیار

۱- گروه مهندسی قدرت - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
mshamsi@birjand.ac.ir
۲- گروه مهندسی قدرت - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
M.KHALGHANI@ieee.org
۳- گروه مهندسی قدرت - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
mfarshad@birjand.ac.ir

چکیده: دسترسی به برق با کیفیت بالا یکی از اهداف شبکه‌های الکتریکی است. هر گونه اغتشاش در سیستم‌های توزیع، باعث ایجاد اختلالاتی در ولتاژ می‌شود. به منظور جبران این اختلالات بر روی مصرف‌کنندگان حساس، از ادوات مختلفی استفاده می‌شود. در این تحقیق از DVR استفاده شده که توانایی مقابله در برابر اثرات تغییرات ولتاژ را برای بار حساس دارد. بدلیل داشتن رفتار دینامیکی بعضاً پیچیده در شبکه‌های قدرت بخصوص در هنگام خطا از کنترل‌کننده خودتنظیم عاطفی که خود کنترلر تطبیقی قدرتمندی است، استفاده شده است. جهت بهبود عملکرد این کنترلر در راستای شاخصهای کیفیت توان از قبیل فلش و THD ولتاژ بار حساس، ساختار جدیدی برای این کنترلر پیشنهاد شده است، تا بتوان بهره‌وری بیشتری از عملکرد آن در شرایط خطا گرفت. با توجه به شبیه‌سازی، نتایج بهتری نسبت به کنترلر PI کلاسیک و همچنین کنترلر عاطفی مرسوم حاصل گردیده است.

واژه های کلیدی: کیفیت توان، DVR، بار حساس، کنترلر تطبیقی، کنترلر خودتنظیم عاطفی دوهدفه

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۰۴/۰۷

نام نویسنده‌ی مسئول : محمدعلی شمسی نژاد

نشانی نویسنده‌ی مسئول : **اتاق ۲۵۴- گروه مهندسی قدرت - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران**

Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity (IEIJQP) -Vol.1, No.1,2012

۱- مقدمه

امروزه با افزایش تعداد مصرف‌کنندگان حساس صنعتی و خدماتی تقاضا برای دسترسی به توان الکتریکی به صورت پایدار و با کیفیت استاندارد به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. در محیط رقابتی صنعت، با توسعه بهره‌گیری بنگاه‌های تولیدی از ادوات الکترونیک قدرت، پردازنده‌های کامپیوتری و بارهای غیرخطی هرگونه وقفه و یا تغییرات خارج از دامنه استاندارد در کیفیت توان تحویلی باعث ضرر اقتصادی خواهد شد. نمود این ضرر اقتصادی را می‌توان در قالب‌هایی چون: از دست رفتن فرصت‌های رقابت تولیدکننده، کاهش راندمان و افزایش هزینه‌های تولید، افت کیفیت محصول، کاهش عمر تجهیزات و افزایش هزینه تعمیرات، وقفه در تولید و تلفات انرژی مورد بررسی قرار داد. بنابراین دسترسی به برق با کیفیت، تاثیر به سزایی در صرفه‌جویی سرمایه و مزیت اقتصادی برای یک بنگاه تولیدی می‌باشد[۱].

اغتشاش در سیستم توزیع انرژی الکتریکی باعث ایجاد اختلالاتی مخربی در سیستم توزیع همچون وقفه[1]، کاهش ولتاژ[2]، افزایش ولتاژ[3] و نوسان دامنه[4] ولتاژ می‌شود . از جمله مهمترین اغتشاشات مورد اشاره کاهش ولتاژ می‌باشد که در استاندارد IEEE با این عبارات تعریف شده است: کاهش ناگهانی مقدار ولتاژ به میزان ۱۰ ٪ تا ۹۰ ٪ در مدت زمان ۰.۵ سیکل تا ۱ دقیقه[۲] که به علت پدیده‌هایی طبیعی همچون خطاهای نامتقارن در شبکه و پدیده‌های الکترومغناطیسی همچون جریان‌های راه‌اندازی و هجومی رخ می‌دهد.

به منظور جبران تاثیر مخرب اختلالات ذکر شده بر روی مصرف‌کنندگان حساس سیستم توزیع بهره‌گیری از ادوات Custom Power مورد توجه کارشناسان قرار گرفته است. از جمله این ادوات، DVR می‌باشد که توانایی مقابله در برابر اثرات کاهش ولتاژ و افزایش ولتاژ را در اختیار بهره‌بردار بار حساس قرار می‌دهد. ساختار این جبرانساز در ساده‌ترین بیان از منبع ذخیره انرژی، اینورتر ولتاژ و ترانس کوپلاژ تشکیل شده است. این ابزار پس از تشخیص کمبود ولتاژ در فیدر منتهی به بار حساس با تولید ولتاژ مناسب از طریق ترانس کوپلاژ که به صورت سری با مصرف کننده حساس قرار دارد ولتاژ را به شبکه تزریق کرده و از اثرگذاری پدیده کاهش ولتاژ می‌کاهد.

به منظور دستیابی به عملکرد مناسب، استراتژی‌های کنترلی مختلفی همچون کنترل پیش‌بین[۳]، کنترل مدلغزشی[۴] و کنترل مقاوم[۵] برای کنترل ولتاژ تزریقی مورد استفاده قرار گرفته شده است. همچنین در [۶] از کنترلر H_∞ و در [۷] از کنترلر مبتنی بر تکرار برای گرفتن عملکرد بهتر در حالتهای ماندگار و گذرا استفاده شده است. در [۸] از کنترل‌کننده فازی در ساختار DVR استفاده شده است. در [۹] از اینورتر چندسطحی با ساختار کنترلی بهینه و پیش‌بینی‌کننده بهره گرفته شده است. در [۸-۹]، بهبود شاخص THD ولتاژ نیز به عنوان یک هدف و معیار کنترلی با اهمیت در نظر گرفته شده است. اما در تمامی مراجع یاد شده تاکنون از الگوریتمهایی با پیچیدگی‌های بالا استفاده شده است که ممکن است با مشکلاتی در پیاده‌سازی عملی روبرو شد. با وجود اینکه استراتژی‌های کنترلی بکار گرفته شده می توانند ضربه‌های ناشی از فلش ولتاژ در بار حساس را کاهش دهند، اما اغلب این روشها کاهش THD ولتاژ را در نظر نمی‌گیرند. این روشها به وقفه‌های کوتاه ولتاژ چه حفره‌ها و شکافهای تیز و چه بروز فراجهش در ابتدا و انتهای فلش اهمیتی نمی‌دهند [۹]. در بسیاری از بارها از جمله بارهای حساس حاوی تجهیزات پزشکی و سیستمهای درایو موتور با قابلیت تنظیم سرعت این درجه از حساسیت می‌تواند با بسیار با اهمیت باشد.

در بسیاری از تحقیقات ذکر شده، سعی شده تا از کنترل‌کننده‌ای پایدار در سیستم بهره گرفته شود، تا بتواند در شرایط مختلف خطا در شبکه، به بهترین شکل ممکن واکنش نشان دهد. مقاله [۱۰] جز معدود تحقیقاتی است که سعی بر بهبود شاخص THD ولتاژ بار حساس علاوه بر فلش ولتاژ آن داشته است. در این تحقیق از الگوریتمهای جستجوی تکاملی برای بهینه‌سازی دو هدفه ساختار کنترلی DVR استفاده شده است. به این روش از دو جهت ایراداتی وارد است. اول اینکه شبکه‌های قدرت و جبرانسازها ماهیت کاملا غیرخطی دارند، که این مقوله ممکن است سبب شود این الگوریتمها که بر اساس جستجوی تصادفی عمل می‌کنند دچار ضعف در پیدا کردن پاسخ بهینه واقعی برای این ساختار شوند و در نهایت به بهینه محلی همگرا شوند. همچنین ذکر این نکته ضروری است در شبکه‌های قدرت واقعی این فرآیند جستجو بسیار طولانی می‌شود. دوم اینکه شبکه‌های قدرت بخصوص در شرایط خطا رفتارهای دینامیکهای متفاوتی دارند، به این دلیل PID بهینه شده با الگوریتمهای جستجوی برون-خط[5] ممکن است نتواند عملکرد مناسبی در این شرایط داشته باشد. در این مقاله سعی شده روشی جهت برطرف کردن این مشکلات مطرح شود. در نتیجه روش تطبیقی نسبتاً نوینی که اصول آن بر پایه تصمیم‌گیری بر اساس عواطف و احساسات است، معرفی شده است. این روش تطبیقی که از طبیعت یادگیری مغز انسانها الهام گرفته است، به عنوان کنترل‌کننده PI خودتنظیم استفاده شده است. برای اینکه این کنترل‌کننده قادر به عملکرد مناسب در برابر فلش و THD ولتاژ بار حساس در زمان خطا باشد، ساختار دو هدفه‌ای برای آن پیشنهاد شده است. برای نمایش و بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، عملکرد

1- Interruption
2- Voltage Sag
3- Voltage Swell
4- Flicker

5- off-line

جبرانساز DVR در حضور انواع خطا در یک شبکه نمونه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از عملکرد کنترلر پیشنهادی با کنترلر عاطفی مرسوم و کنترلر PI کلاسیک مقایسه شده است.

ساختار ادامه مقاله بدین شرح است. در بخش ۲ به معرفی و توصیف عملکرد DVR پرداخته شده است. در بخش ۳ ساختار کنترل‌کننده عاطفی مورد نظر معرفی و در بخش ۴ از آن جهت پیشنهاد روشی جدید برای کنترل DVR استفاده شده است. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی‌های انجام گرفته آورده شده‌اند و بالاخره مقاله با ارائه نتیجه‌گیری در بخش ۶ خاتمه می‌یابد.

۲- معرفی ساختار و عملکرد DVR

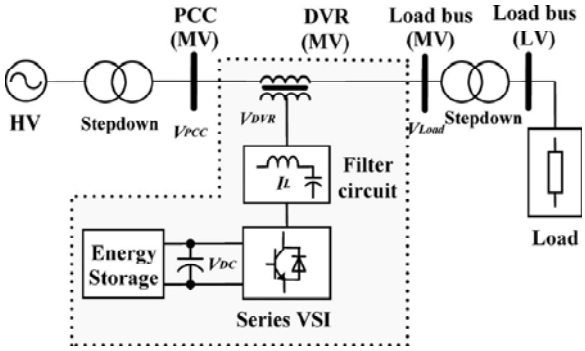
DVR یکی از ادوات custom power در شبکه توزیع می‌باشد که به صورت سری با آن متصل می‌شود. آنها ولتاژ بار را با تزریق ولتاژهای سه فاز خروجی در طول اختلال در سیستم قدرت و با کنترل دامنه و فاز و فرکانس ولتاژ ثابت نگه می‌دارند. پس اساس عملکرد DVR ، تزریق ولتاژ مورد نیاز در مواقع بروز SAG ولتاژ برای جبران سازی آن می‌باشد. بطور کلی عملکرد DVR می تواند به دو حالت تقسیم‌بندی شود، که عبارتند از: standby mode و injection mode [۱۱]. در حالت اول در صورت بروز یا عدم بروز اتصال کوتاه، ولتاژ کوچکی جهت پوشش افت ولتاژ ناشی از تلفات راکتانس ترانسفورماتور تزریق می‌شود. در حالت دوم به محض آشکار شدن SAG ولتاژ، DVR به تزریق ولتاژ به بار حساس مورد نظر می پردازد.

مدار DVR شامل ۵ جز اصلی می‌باشد که در شکل (۱) مشخص شده است:

۱) ترانسفورماتور سری: سیم پیچ اولیه آن به پل اینورتر و سیم پیچ ثانویه آن به شبکه توزیع و بار حساس متصل شده است.

۲) اینورتر منبع ولتاژ: این پل اینورتر به اولیه ترانس تزریق متصل شده است. یک تجهیز ذخیره کننده انرژی برای پل اینورتر در نظر گرفته شده است. این اینورترها شامل سوییچهای IGBT خود کموتاسیون با دیودهای موازی شده با آنها می‌باشد و از تکنیک PWM برای کنترل آن استفاده شده است.

۳) المان ذخیره ساز انرژی: منابع ذخیره کننده انرژی از قبیل باتری‌ها، بانکهای خازنی، SMES و فلایویلها که در DVR برای فراهم کردن سطح ولتاژ لازم و توان اکتیو به منظور جبرانسازی SAG ولتاژ استفاده می‌شود [۱۲].



شکل (۱): مدار DVR در شبکه قدرت

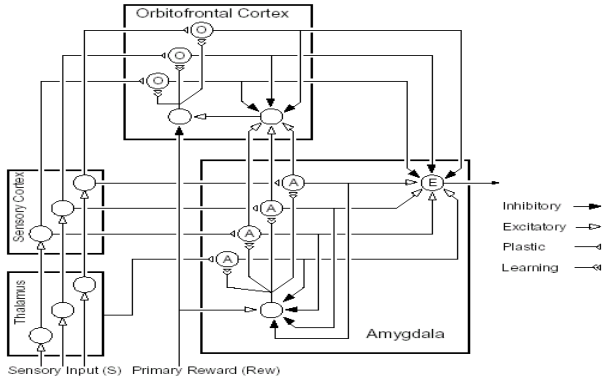
۴) فیلتر پسیو: در سمت ولتاژ زیاد اینورتر قرار گرفته تا هارمونیکهای تولیدی ناشی از کلیدزنی را حذف کند.

۵) سیستم کنترل: منطق این سیستم کنترل، بر پایه آشکارسازی افت ولتاژ و فراهم کردن استراتژی مناسب کلیدزنی اینورتر می‌باشد.

سیستم کنترل، از تبدیل abc-dq برای بدست آوردن v_d و v_q استفاده می‌کند. در طول شرایط نرمال و متعادل این ولتاژها برابر $v_d=1$ و $v_q=0$ باشند. اما در صورت بروز خطا مقدار این ولتاژها تغییر می‌کند [۸]، در نتیجه با مقایسه این ولتاژ، با ولتاژهای مرجع v_d و v_q مذکور، دادن سیگنال خطای آن به کنترلر PI برای هر یک از آنها می‌توان تغییرات آن را کنترل کرد.

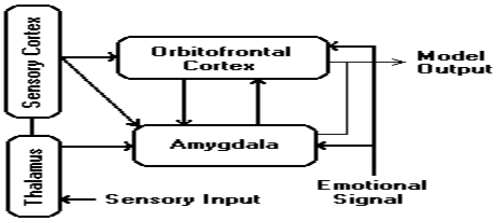
۳- ساختار یادگیری عاطفی مغز انسان

این ساختار برای اولین بار در سال ۲۰۰۰ توسط دو محقق به نامهای مورن و بالکنیوس مطرح شد. این محققین به توسعه مدلهای محاسباتی از عملکرد بخشهایی از مغز که وظیفه پردازش عاطفی را برعهده دارند، پرداختند. در [۱۳]، مدل محاسباتی جدیدی از عملکرد بخش پردازش عاطفه‌های مغز، شامل واحدهای: آمیگدالا (amygdala)، قشر اربیتوفرانتال (orbitofrontal cortex)، تالاموس (thalamous) و بالاخره پوسته حسی (sensory cortex) ارائه شده است (شکل (۲)).



شکل (۲): شماتیک جزئیات مدل محاسباتی پیشنهادی از سیستم یادگیری عاطفی مغز[۱۳]

با توجه به مدل فوق و بر طبق نظریه‌های جدید، سیستم آمیگدالا- اربیتوفرانتال در دو مرحله فرآیند یادگیری را انجام می‌دهد. ابتدا سیگنالهای تحریک ورودی ارزیابی شده و در مرحله بعد، از ارزیابی انجام گرفته به عنوان ضرایب تقویت‌کننده در پاسخ متأثر از تحریک استفاده می‌شود. آمیگدالا به عنوان یکی از ساختارهای اولیه مغز می‌باشد که بصورت نسبتاً یکنواخت در ساختارهای مقیاس بزرگ، میان گونه‌های مختلف جانداران وجود دارد. آمیگدالا یک شبکه کوچک در قسمت بادامی شکل گیجگاهی (temporal lobe) است که وظیفه ارزیابی عاطفی محرکها را بر عهده داشته که این ارزیابیها، در خصوص: حالات و واکنشهای عاطفی، سیگنالهای توجه و همچنین حافظه بلند مدت مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعدادی از محرکهای ذاتی از جمله: گرسنگی، درد، بعضی از بوها و غیره، می‌توانند آمیگدالا را تحریک کرده و پاسخ آمیگدالا به این تحریکها در بخش یادگیری مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحقیقات انجام گرفته توسط دانشمندان نشان می‌دهد که حیواناتی که از ناحیه آمیگدالا دچار صدمه شده‌اند در یادگیری مشکل دارند و این گواه این ادعا است که یادگیری در بخش آمیگدالا انجام می‌پذیرد. از طرف دیگر، قشر اربیتوفرانتال، به عنوان اصلاحکننده پاسخها و عکس‌العمل‌های نامناسب آمیگدالا ایفای نقش می‌کند. آزمایشات متعدد انجام گرفته بر روی بیماران دارای اربیتوفرانتال صدمه دیده نشان‌داده است که این بیماران قادر به تطابق خود با شرایط جدید نیستند (بعبارت دیگر، یادگیریهای قبلی مانع از درک و متعاقباً پاسخ مناسب به شرایط جدید می‌شود).



شکل (۳): نمایش بلوکی مدل محاسباتی ارائه شده از مکانیسم یادگیری مغز انسان [۱۴]

با صرفنظر از جزئیات، طرح شماتیکی سیستم یادگیری عاطفی مغز در شکل (۳) نشانداده شده است که در ادامه، جهت تشریح مدل محاسباتی پیشنهادی از سیستم یادگیری عاطفی آمیگدالا - اربیتوفرانتال مورد استفاده قرار می‌گیرد. خروجی مدل محاسباتی MO (پاسخ سیستم یادگیری عاطفی آمیگدالا- اربیتوفرانتال به تحریک ورودی SI و سیگنال عاطفی پاداش/ جزاء EC) به صورت رابطه (۱) است.

$$MO = AO - OCO \qquad (۱)$$

که در آن AO و OCO به ترتیب خروجی واحدهای آمیگدالا و اربیتوفرانتال بوده که در رابطه‌های (۲) آمده است.

$$\begin{aligned} AO &= G_a \cdot SI \\ OCO &= G_{oc} \cdot SI \end{aligned} \qquad (۲)$$

که در آن G_a و G_{oc} به ترتیب گین معادل واحدهای آمیگدالا و اربیتوفرانتال هستند. قانون یادگیری در واحدهای آمیگدالا و اربیتوفرانتال به ترتیب در رابطه (۳) ارائه شده است.

$$\begin{aligned} \Delta G_a &= k_1 \cdot \max(0, EC - AO) \geq 0 \\ \Delta G_{oc} &= k_2 \cdot (MO - EC) \end{aligned} \qquad (۳)$$

که در آن k_1 و k_2 به ترتیب نرخ یادگیری در واحدهای آمیگدالا و اربیتوفرانتال هستند. همانطور که از رابطه اخیر مشخص است، بدلیل استفاده از عملگر max، گین واحد آمیگدالا محکوم به تغییرات یکنوای افزایشی است و البته این موضوع منطبق بر واقعیت فیزیولوژی مورد اشاره در پاراگراف قبلی است که بر طبق آن، واحد آمیگدالا قادر به فراموشی آنچه قبلاً یاد گرفته نیست. بعبارت دیگر، شرایط مطلوب کاری (که در مقادیر بزرگ سیگنال عاطفی EC انعکاس می‌یابد) به تدریج منجر به افزایش گین واحد آمیگدالا به سقف فیزیکی آن خواهد شد. حال چنانچه بدلایلی شرایط مطلوب فوق در آینده نامطلوب شوند (با مقدار کوچک سیگنال عاطفی EC) واحد آمیگدالا قادر به تشخیص این مسأله و اصلاح پاسخ خود نبوده و عملاً مشابه شرایط مطلوب پاسخ خواهد داد. در هر حال، گین واحد اربیتوفرانتال مجاز به تغییرات مثبت/ منفی بوده تا بتواند در قبال پاسخهای نامناسب واحد آمیگدالا اصلاح مناسب را انجام دهد.

۴- کنترل هوشمند DVR مبتنی بر یادگیری عاطفی

از ترکیب روابط (۱) الی (۳) رابطه (۴) حاصل شده است:

$$MO = (G_a - G_{oc}) \cdot SI \equiv G(SI, EC, \ldots) \cdot SI \qquad (۴)$$

بعبارت دیگر، خروجی سیستم یادگیری عاطفی آمیگدالا- اربیتوفرانتال برابر است با حاصلضرب یک گین متغیر G (وابسته به عوامل متعدد از جمله: سیگنال عاطفی EC، تحریک ورودی SI، و غیره) در تحریک ورودی SI. با توجه به ارزش و کارایی کنترل‌کننده PID خود- تنظیم در حوزه کنترل عملکرد DVR، سرراست‌ترین پیشنهاد مناسب برای فرمول‌بندی سیگنال تحریک SI، یک قالب PID گونه است [۱۴]

$$SI = k_P \cdot e_w + K_I \cdot \int_0^t e_w \, dt + K_D \cdot \dot{e}_w \qquad (۵)$$

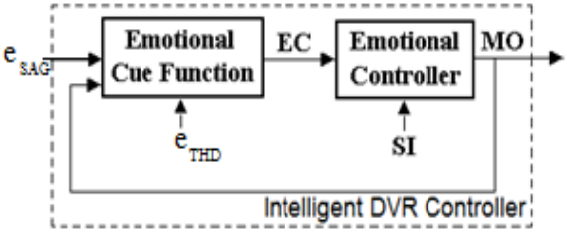
که در آن $e_w = w_{ref} - w$ خطای ردیابی سیگنال فلش ولتاژ سیستم حلقه بسته است. بدلایل متعدد از جمله: نویز ادوات اندازه گیری و نیز ضرورت کلیدزنی بعضاً شدید در مدار مبدل جبرانساز، عامل مشتق‌گیر عملاً باعث بدتر شدن عملکرد سیستم گشته بطوریکه در بهترین حالت، کنترل‌کننده DVR نوع PID عملاً عملکردی بهتر از کنترل‌کننده نوع PI نخواهد داشت. سیگنال عاطفی EC نیز در حالت

کلی بایستی گویای میزان مطلوبیت عملکرد کنترل‌کننده DVR و سیستم حلقه بسته باشد.

سیگنال عاطفی EC نیز در حالت کلی بایستی گویای میزان مطلوبیت عملکرد کنترل‌کننده فلش ولتاژ و سیستم حلقه بسته باشد. لذا می توان، بدون از دست دادن کلیت، EC را برحسب یک ترکیب وزنی از اهداف اولیه/ ثانویه مطرح در حوزه کاربردی نوشت. در روش پیشنهادی در این مقاله، THD ولتاژ به عنوان هدف دوم بکار گرفته شده است. با این تفاسیر سیگنال EC به صورت رابطه (۶) حاصل می-شود.

$$EC = a_{ec1}.e_{SAG} + a_{ec2}.MO + a_{ec3}.e_{THD} \qquad (۶)$$

در این رابطه a_{ec1} و a_{ec2} و a_{ec3} به ترتیب ضرایب وزنی هر یک از سیگنالهای خطای فلش ولتاژ، خروجی مدل محاسباتی و سیگنال خطای THD ولتاژ می‌باشد. نمایش بلوکی این ساختار با سیگنالهای کنترلی پیشنهادی در شکل (۴) وجود دارد.

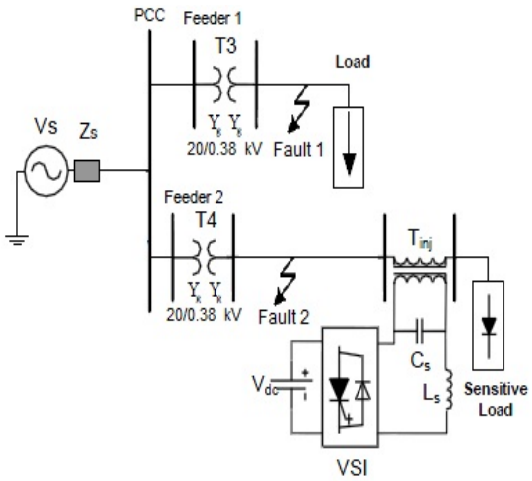


شکل (۴): نمایش بلوکی کنترل‌کننده PI هوشمند خودتنظیم پیشنهادی

۵- شبیه‌سازی و نتایج

شبکه مورد بررسی، دارای دو شین که یکی از آنها بار حساس است، می‌باشد. این شبکه ساده در شکل (۵) نشان داده شده و پارامترهای آن در جدول (۱) آمده است.

در سیستم توزیع هر چه خطا رخ داده به نقطه مورد نظر نزدیکتر باشد، اثر افت ولتاژ بیشتری روی آن نقطه دارد. در نتیجه برای مدلسازی شرایط بحرانی‌تر از دو خطا در شبیه‌سازی که یکی از آنها دقیقا بعد از ترانسفورماتور تزریق سری و دیگری در نزدیکی بار غیر حساس می‌باشد، استفاده شده است. اولین خطا اتصال کوتاه در فاز B و خطای اتصال کوتاه دوم در فازهای A و B می‌باشد، که خصوصیات آن در جدول (۲) آمده است.



شکل(۵): شبکه مورد بررسی

جدول (۱): پارامترهای شبکه

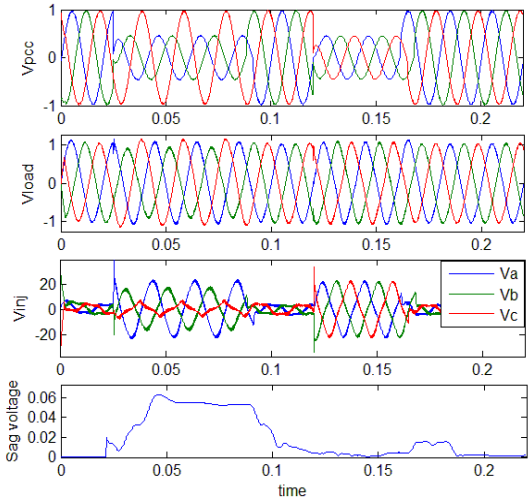
پارامترها	مقادیر
فرکانس شبکه ولتاژ منبع تغذیه	Fn=50 (Hz) Vs=22500 (v)
توانهای اکتیو و راکتیو بار حساس	P=2000 (w) Ql=40 (var) QC=10 (var)
توانهای اکتیو و راکتیو بار غیرحساس	P=2500 (w) Ql=40 (var)
توان نامی و نسبت تبدیل دو ترانس شبکه	Pn=3200 (w) 20000/380
امپدانسهای دو ترانس شبکه	Rl=0.0003 (p.u) Xl=0.001 (p.u) Rm=Xm=500 (p.u)
توان نامی و نسبت تبدیل ترانس تزریق	Pn=1500 (w) 100/1000
امپدانسهای ترانس تزریق	Rl=0.00001 (p.u) Xl=0.0003 (p.u) Rm=Xm=500 (p.u)
فرکانس کلیدزنیDVR	FS=10000 (Hz)
ولتاژ المان ذخیره کننده انرژی	VDC=200 (v)
امپدانس فیلتر پسیو سری و موازی	RS=0.2 (ohm) LS=6 (mH) RP=0.2 (ohm) CP=20 (μF)

جدول (۲): مشخصات خطاهای موجود در شبکه مورد بررسی

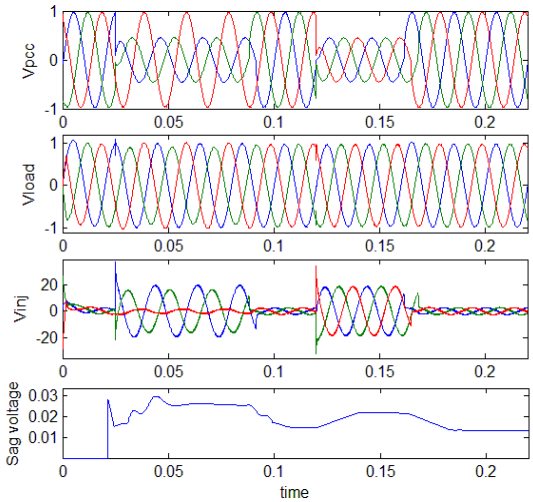
مقاومت زمین(Ω)	مقاومت خطا(Ω)	زمان خطا(s)	فازهای تحت خطا	حالات

۱	1) A,B	[۰/۰۲۵ ۰/۰۸۵]	٤/٦	۰/۱
	2) A,B,C	[۰/۱۲ ۰/۱٦]	٤/٦	۰/۱
۲	1) A,C	[۰/۰۲۵ ۰/۰۸۵]	٤/٦	۰/۱
	2) B	[۰/۱۲ ۰/۱٦]	٤/٦	۰/۱

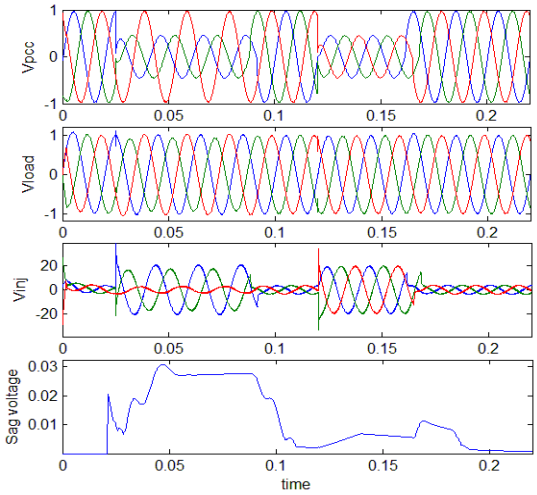
کنترل DVR با در نظر گرفتن PID معمولی، کنترلر عاطفی مرسوم (تک‌هدفه) و کنترلر عاطفی پیشنهادی (دوهدفه) با در نظر گرفتن سیگنال THD ولتاژ به عنوان هدف دوم، تحت خطاهای مختلف در شبکه کنترل شده است. هر دو حالت ذکر شده در جدول (۲) شبیه‌سازی شده و نمودارهای ولتاژ باس PCC و ولتاژ بار حساس در شبکه، ولتاژ تزریقی به بار حساس توسط جبرانساز و سیگنال فلش ولتاژ به ترتیب در تمامی شکلهای (۶) تا (۱۱) آورده شده است. سیگنال فلش ولتاژ از تفاضل سیگنال مقدار مطلوب ولتاژ بار (یک پریونیت) از ولتاژ واقعی حاصل می‌شود. شکلهای (۶)، (۷) و (۸) مربوط به اولین حالت خطا در سیستم می‌باشد، که به ترتیب با کنترلر PI معمولی، کنترلر عاطفی مرسوم و کنترلر عاطفی پیشنهادی کنترل شده است.



شکل (۶): کنترل DVR با کنترلر PI کلاسیک در حالت اول

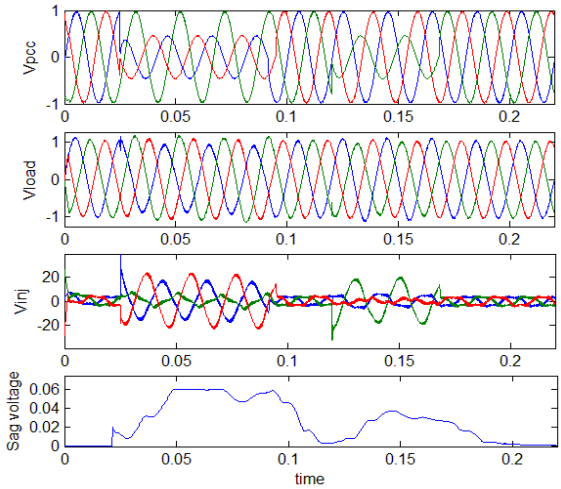


شکل (۷): کنترل DVR با کنترلر PI عاطفی تک‌هدفه در حالت اول

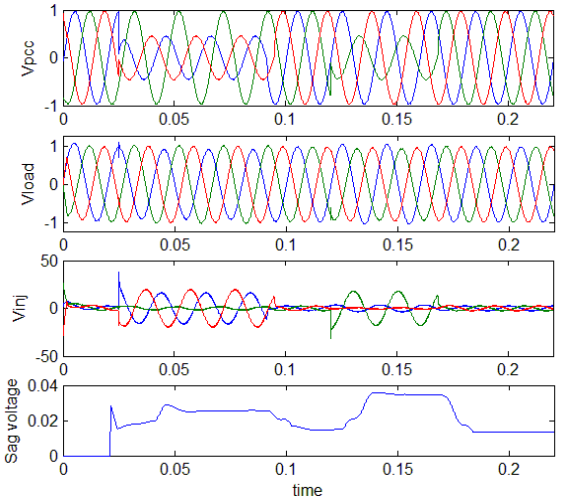


شکل (۸): کنترل DVR با کنترلر PI عاطفی دوهدفه در حالت اول

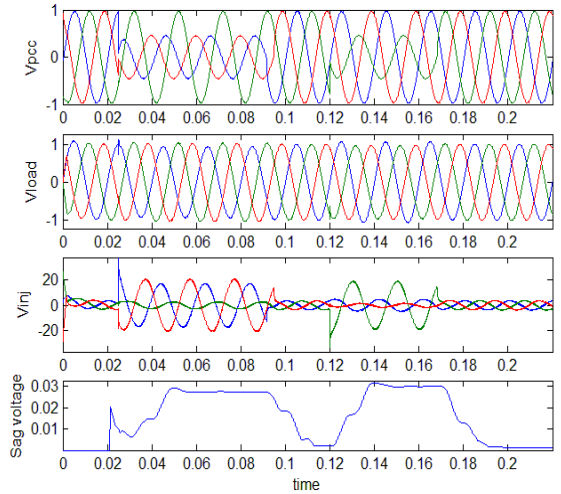
همچنین شکلهای (۹)، (۱۰) و (۱۱) مربوط به دومین حالت خطا در سیستم می‌باشد، که به ترتیب با کنترلر PI معمولی، کنترلر عاطفی مرسوم و کنترلر عاطفی پیشنهادی کنترل شده است.



شکل (۹): کنترل DVR با کنترلر PI کلاسیک در حالت دوم



شکل (۱۰): کنترل DVR با کنترلر PI عاطفی تک‌هدفه در حالت دوم



شکل (۱۱): کنترل DVR با کنترلر PI عاطفی دوهدفه در حالت دوم

بهبود قابل توجه عملکرد DVR با کنترلر عاطفی مرسوم نسبت به کنترلر PI کلاسیک در هر دو شرایط خطا محسوس است. این بهبود را می توان مدیون قابلیت بالای پاسخ به رفتارهای دینامیکی و همچنین داشتن سیگنال فیدبک تلاش کنترلی در کنترلر یاد شده دانست. وجود این سیگنال کنترلی و همچنین ساختار کنترلی پویای آن سبب می شود تا حد زیادی بهبود در عملکرد جبرانساز برای بازیابی ولتاژ بار حساس حاصل شود. این بهبود نه تنها در جبران فلش ولتاژ دیده می شود، بلکه در THD آن نیز کاملا جلوه‌گر است. پس تا حد قابل قبولی جبرانسازی می‌توان از ساختار کنترلی مرسوم کنترلر عاطفی بهره برد. اما با بکارگیری ساختار پیشنهادی برای کنترلر عاطفی می‌توان باز هم عملکرد جبرانسازی را بهبود بخشید. در جدول (۳) می‌توان از چگونگی اصلاح شاخص‌های کیفیت توان بار در هر سه روش کنترلی با جزئیات بیشتر اطلاع پیدا کرد. در این جدول مقادیر دو شاخص نام برده شده و درصد بهبود دو روش کنترلر عاطفی تک هدفه و دوهدفه نسبت به کنترلر PI کلاسیک ذکر شده است. در تحقیقات مختلف تاکنون، داشتن نگاهی دوهدفه به کنترل‌کننده یک جبرانساز متداول نبوده و در بررسی‌هایی که روی تحقیقات و مقالات مختلف صورت گرفت، تنها مرجع [۱۰] را می‌توان معرفی کرد. حال به منظور نشان دادن عملکرد مناسب روش پیشنهادی نسبت به کنترلر مطرح شده در مرجع [۱۰] (که یک PI کلاسیک تنظیم شده با الگوریتم کاوشگر PSO دوهدفه است) نتایج ناشی از این تنظیم کنترلر برای شبکه مورد تست در جدول ۳ مورد بررسی و با نتایج الگوریتم پیشنهادی مقایسه شده است.

جدول (۳): نتایج دو شاخص THD، SAG ولتاژ در هر سه روش کنترلی

		میانگین فلش ولتاژ		THD (%)	
کنترل‌کننده‌ها	حالات	مقدار	درصد بهبود (٪)	مقدار	درصد بهبود (٪)
PI کلاسیک	حالت ۱	۰.۰۱۸۹	-	۳.۸۳	-
	حالت ۲	۰.۰۲۴۸	-	۲.۹۵	-
PSO تک‌هدفه	حالت ۱	۰.۰۱۷۱	۹.۵۲	۱.۴۶	۶۱.۸۸
	حالت ۲	۰.۰۱۸۴	۲۵.۸	۱.۵۹	۴۶.۱
PSO دوهدفه	حالت ۱	۰.۰۱۱	۴۱.۷۹	۰.۷۲	۸۱.۲
	حالت ۲	۰.۰۱۶۱	۳۵.۰۸	۰.۷۴	۷۴.۹۱
PI عاطفی تک هدفه	حالت ۱	۰.۰۱۷۷	۶.۳۴	۰.۶۱	۸۴.۰۴
	حالت ۲	۰.۰۲۰۳	۱۸.۱۴	۰.۶۳	۵۷.۲۸
PI عاطفی دوهدفه	حالت ۱	۰.۰۱۱	۴۱.۷۹	۰.۵۸	۸۴.۸۵
	حالت ۲	۰.۰۱۵۸	۳۶.۲۹	۰.۵۹	۸۰

همانطور که مشخص است عملکرد کنترلر عاطفی پیشنهادی باز هم نسبت کنترلر عاطفی مرسوم بهبود یافته است. این نکته قابل توجه است که در کنترلر پیشنهادی هر دو شاخص فلش و THD ولتاژ نسبت به کنترلر عاطفی مرسوم کاهش یافته‌اند. به عبارت دیگر با در نظر گرفتن سیگنال کنترلی THD ولتاژ به عنوان هدف دوم، نه تنها این شاخص بهبود یافته بلکه توانسته هدف اصلی این جبرانسازی یعنی فلش ولتاژ را نیز متعاقبا کاهش دهد. همچنین با مقایسه کنترل‌کننده عاطفی به صورت تک‌هدفه و دوهدفه با تنظیم ضرایب PI با الگوریتم PSO بهبودیافته به صورت تک‌هدفه و دوهدفه می‌توان پی به عملکرد قدرتمند کنترلر عاطفی بخصوص به صورت دوهدفه برد. همچنین باید در نظر داشت الگوریتم PSO مطرح شده در [۱۰] و بکار گرفته شده در این مقاله برای یک شبکه مورد تست کوچک استفاده شده است. بدیهی است با بزرگتر شدن شبکه رفتارهای دینامیک شبکه پیچیده تر شده و ممکن است PI تنظیم شده با الگوریتمهای برون-خط[6] نتواند بخوبی در شرایط مختلف واکنش کنترلی مناسب را از خود نشان دهد. اما کنترل‌کننده عاطفی بدلیل ساختار تطبیقی‌اش می‌تواند در شرایط مختلف بهتر عمل کند. به منظور جلوگیری از ازدیاد نمایش نتایج در حالتهای مختلف، از نشان دادن نتایج الگوریتم PSO به صورت شکل صرفنظر شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در کل زمان شبیه‌سازی الزامات استاندارد هارمونیکی IEEE-519 رعایت شده است. این الزامات کمتر بودن THD ولتاژ بار زیر ۵٪ است. در نتیجه می‌توان این کنترلر را به عنوان یک کنترلر مناسب در شرایط مختلف دینامیکی خطا در شبکه، همچنین به عنوان اصلاح کننده شاخصهای کیفیت توان یاد شده معرفی کرد.

۶- نتیجه

با توجه به نتایج ناشی از اعمال الگوریتم پیشنهادی در شبکه مورد تست، می‌توان گفت این الگوریتم، روشی مناسب برای بهبود کیفیت توان برای مصرف‌کنندگان می‌باشد. همانطور که مشخص است، به دلیل رفتارهای دینامیکی شبکه قدرت در شرایط نرمال و خطا مدل کاملا مشخصی از آن نمی‌توان در دست داشت. بدین منظور برای عملکرد دقیق و سریع جبرانسازها می‌بایست از الگوریتمهای کنترلی تطبیقی بهره جست. در این مقاله از سه کنترل‌کننده PI کلاسیک، کنترلر عاطفی تک‌هدفه و دوهدفه بهره گرفته شده است و همچنین این کنترلرها با کنترل‌کننده PI کلاسیک تنظیم شده با الگوریتم PSO بهبود یافته که در مرجع [۱۰] مطرح شده است، مقایسه شده است. در ادامه به مقایسه بیشتر بین آنها پرداخته شده است. ایده‌های نوین مطرح شده در این مقاله را می‌توان از سه جهت مورد بررسی قرار داد:

۱. مطرح کردن یک کنترل‌کننده تطبیقی (کنترلر عاطفی) برای کنترل DVR و مزایای خاص استفاده از آن : همانطور که از نتایج مشخص می‌شود بهره‌گیری ازکنترل‌کننده عاطفی به عنوان یک کنترلر تطبیقی عملکرد تا حدی بهتر نسبت به کنترلر PI تنظیم شده با الگوریتم PSO بهبود یافته و بسیار بهتر نسبت به کنترلر کلاسیک PI داشته است. دلیل این امر رفتارهای بعضاء پیچیده‌ی دینامیکی سیستم قدرت بخصوص در شرایط خطا می‌باشد. طراحی این کنترلر از پیچیدگی زیادی برخوردار نیست، در نتیجه پیاده‌سازی عملی آن مفید ارزیابی می‌شود. باید توجه داشت عملکرد مناسب روش پیشنهادی بدون بکارگیری تجهیزات جانبی خاص است، که می‌تواند از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد. به عبارت دیگر، کنترلر PI کلاسیک از لحاظ سخت افزاری با کنترلر های عاطفی پیشنهادی تفاوتی نداشته و با این وجود عملکرد بسیار بهتری نسبت به این روشهای کلاسیک حاصل گشته است.

۲. مطرح کردن ایده کنترلر عاطفی دوهدفه: برای اولین بار در این مقاله کنترلر عاطفی که در زمره کنترل‌کننده‌های هوشمند و تطبیقی قلمداد می‌شود، دو هدفه گردیده است. به عبارت دیگر، سیگنال THD ولتاژ بار حساس به عنوان هدف دوم جهت بهینه‌سازی آن، در نظر گرفته شده است. همانطور که از نتایج مشخص است کنترلر عاطفی دو هدفه عملکرد بسیار بهتری نسبت به کنترلر عاطفی تک هدفه (و همچنین کنترلر PI کلاسیک) داشته است. همچنین نشان داده شد PI تنظیم شده با الگوریتم PSO دوهدفه نیز عملکردی ضعیفتر نسبت به کنترلر عاطفی دوهدفه دارد.

۳. بهبود در سیگنال فلش ولتاژ با در نظر گرفتن سیگنال THD ولتاژ به عنوان هدف دوم: در صورتی که مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از کنترل‌کننده عاطفی تک هدفه و دو هدفه انجام گیرد، می‌توان پی به این نکته برد که نه تنها THD ولتاژ در کنترلر دو هدفه بهبود یافته است بلکه شاهد کاهش فلش ولتاژ نیز نسبت به کنترلر تک هدفه خواهیم بود. همانطور که از نتایج مشخص می شود، هم هارمونیک و هم فلش ولتاژ بار حساس با وجود کنترلر عاطفی دو هدفه نسبت به تک هدفه (و همچنین کنترلر PI کلاسیک) بهبود بیشتری یافته است.

مراجع

[1] J. V. Milanovic, and Y. Zhang, "Global Minimization of Financial Losses Due to Voltage Sags With FACTS Based Devices", IEEE Transactions on POWER DELIVERY, VOL. 25, NO. 1, pp. 298-306, JANUARY 2010.

[2] IEEE std. 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.

[6] Offline algorithm

[3] H. Zhou, T. Z. Wei, Y. l. Zhao, Z. p Qi, “Study on Dynamic Matrix Predictive Control of single-phase DVR,” *Proc.* of the Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Nanjing China , pp. 2136-2140, April 2008.

[4] G. V. Nagesh Kumar, D.Deepak Chowdary, “DVR with Sliding Mode Control to alleviate Voltage Sags on a Distribution System for Three Phase Short Circuit Fault,” *Proc.* of the the Third International Conference on Industrial and Information Systems, ., Kharagpur INDIA, pp. 1-4, December 2008.

[5] Y. W. Li, M. Vilathgamuwa, F. Blaabjerg, P. C. Loh, “A Robust Control Scheme for Medium-Voltage-Level DVR Implementation”, IEEE Transactions on INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 54, NO. 4, pp. 2249-2261, AUGUST 2007.

[6] Y. Wei Li, F Blaabjerg, D. M. Vilathgamuwa, and P. Chiang Loh, “Design and Comparison of High Performance Stationary-Frame Controllers for DVR Implementation”, IEEE Transactions on POWER ELECTRONICS, VOL. 22, NO. 2, pp. 602-612, MARCH 2007.

[7] P. Roncero-Sánche, E. Acha, J. E. Ortega-Calderon, V. Feliu, and A. García-Cerrada, “A Versatile Control Scheme for a Dynamic Voltage Restorer for Power-Quality Improvement”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 24, NO. 1, JANUARY 2009.

[8] M. Ashari, T. Hiyama, M. Pujiantara, H. Suryoatmojo, M. Hery Purnomo, “A Novel Dynamic Voltage Restorer with Outage Handling Capability Using Fuzzy Logic Controller”, 2007.

[9] J. Dionísio Barros, and J. Fernando Silva, “Multilevel Optimal Predictive Dynamic Voltage Restorer”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 57, NO. 8, AUGUST 2010.

[۱۰] محمدرضا خلقانی، محمدعلی شمسی‌نژاد، کریم بیکی، رضا شریعتی نسب، "بهینه‌سازی چندهدفه ساختار کنترلی DVR جهت بهبود شاخصهای کیفیت توان"، بیست و ششمین کنفرانس بین المللی برق، psc 2011 تهران، ۱۳۹۰.

[11] V.K. Ramachandaramurthy, A. Arulampalam, C.Fitzer, C. Zhan, M.Barnes and N. Jenkins, “Supervisory control of dynamic voltage restorers “IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. Vol. 151, No. 4, pp. 509-516, July 2004.

[12] H. Abdollahzadeh, M.Fotuhi Firuzabad, A.Tavighi, M. Rezakhah, “Impact of Dynamic Voltage Restorer (DVR) on Reliability Improvement of Distribution System Sensitive Loads”, 22nd International Power system Conference, 2007.

[13] J. Moren, and Balkenius, “A Computational Model of Emotional Learning in the Amygdala,” *from animals to animals 6: Proc. of the 6th International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior*, Cambridge, Mass., 2000 (the MIT Press).

[۱۴] محسن فرشاد، کارو لوکس، جواد فیض، بابک نجار اعرابی، "مدلسازی و کنترل هوشمند موتور سوئیچ رلوکتانس برای کاربرد ماشین لباسشویی" تز دکترای برق، دانشگاه تهران، دانشکده برق و کامپیوتر، ۱۳۸۵.