

بررسی تصحیح ضریب توان در یکسوکننده‌ها به روش سوئیچینگ با استفاده از کنترل کننده حامل غیر خطی نمایی

مجتبی فروغی^۱، حمید کتیرایی^۲

۱- کارشناس ارشد، هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مجلسی، m_forooghi2@yahoo.com

۲- کارشناس ارشد، پتروشیمی بوعلی سینا، Hamid_katirae@yahoo.com

چکیده

در این مقاله کنترل کننده حامل غیر خطی با مولد حامل نمایی جهت تصحیح ضریب توان (PFC) طراحی و شبیه سازی شده است. این کنترل کننده به یکسوکننده تک فاز و سه فاز همراه با رگولاتور بوست اعمال شده و به ازای تغییرات بار اهمی، اهمی سوئیچینگ و سلفی شدید مورد بررسی قرار گرفته است. سپس به ازاء تغییرات وسیع فرکانس سوئیچینگ مقادیر ضریب توان مقایسه و مورد بحث قرار گرفته شده است. جهت ایجاد ولتاژهای کمتر از ولتاژ ورودی از تصحیح کننده ضریب توان توسط رگولاتور باک استفاده می شود ولی PFC نوع باک دارای ضریب توان کمتری نسبت به نوع بوست است به همین دلیل از رگولاتور فلای بک برای ایجاد ولتاژهای کمتر از ورودی در یکسوکننده استفاده شده و به ازاء بارهای مختلف توسط شبیه سازی کامپیوتری ضریب توان محاسبه شده است که نتایج قابل قبولی دارد و ضریب توانی بالاتر از ۰/۹۵ را ایجاد می کند.

واژه های کلیدی

ضریب توان، رگولاتور بوست، کنترل کننده حامل غیر خطی، رگولاتور فلای بک.

۱- مقدمه

کمتری نشان می دهد و نویز کمتری دارد [۱]. کنترل کننده دیگری که نسبت به تغییرات لحظه ای جریان عکس العمل سریع نشان می دهد کنترل کننده حامل غیر خطی جریان پیک^۴ است. در این کنترل کننده مستقیماً از جریان سوئیچ نمونه برداری شده که باعث عکس العمل سریع نسبت به تغییرات لحظه ای جریان می شود ولی نویز آن بیشتر از کنترل کننده غیر خطی شارژ است [۲].

در این مقاله از کنترل کننده حامل غیر خطی نمایی برای کنترل PFC نوع بوست استفاده شده است که معایب فوق را ندارد. ابتدا این کنترل کننده به یک یکسوکننده با رگولاتور بوست اعمال شده و نتایج اعمال بارهای اهمی، سوئیچینگ و سلفی شدید توسط شبیه سازی کامپیوتری مورد بررسی قرار گرفته است. سپس به ازای تغییرات وسیع فرکانس سوئیچینگ تغییرات ضریب توان مقایسه شده است. جهت ایجاد ولتاژهای پائین تر از ورودی از یکسوکننده تک فاز با رگولاتور فلای بک استفاده شده و پس از اعمال کنترل کننده به ازای بارهای مختلف و تغییرات فرکانس سوئیچینگ نتایج مورد بررسی

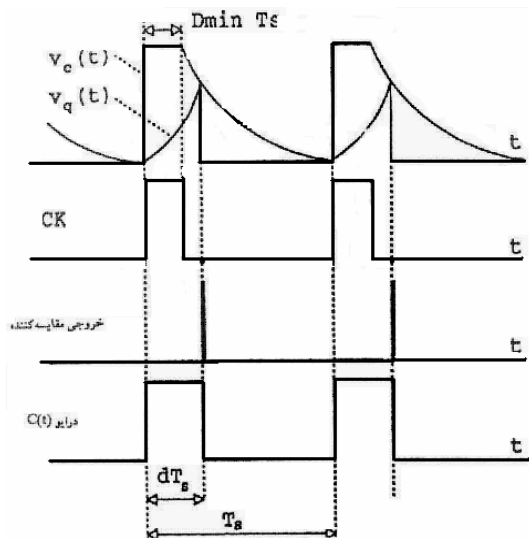
برای تصحیح ضریب توان^۱ (PFC) در یکسوکننده ها روش های مختلفی وجود دارد که شامل تغییر درمدار قدرت یکسوکننده و روش های کنترل مناسب است [۴-۱] یکی از این کنترل کننده ها کنترل کننده مود جریان متوسط^۲ است. که از ولتاژ خروجی نمونه برداری کرده و پس از مقایسه با یک ولتاژ مرجع و ضرب آن در مضربی از ولتاژ ورودی و مقایسه با مضربی از جریان سلف بوست، سیگنال گیت رگولاتور را ایجاد می کند [۵].

عیب اساسی این کنترل کننده ها نمونه برداری از ولتاژ ورودی، جریان سلف و ولتاژ خروجی است که خطای زیادی را ایجاد می کند به علاوه تعداد المان های این کنترل کننده نیز زیاد است. برای رفع معایب ذکر شده می توان از کنترل کننده حامل غیر خطی نوع شارژ^۳ استفاده نمود. در این کنترل کننده از ولتاژ خروجی و جریان سوئیچ نمونه برداری می شود و توسط مولد حامل شارژ، ولتاژ حامل را ایجاد می کند. در این کنترل کننده چون از جریان سوئیچ انتگرال گیری می شود یکسوکننده نسبت به تغییرات لحظه ای جریان عکس العمل

قرار گرفته است. در پایان با اعمال کنترل کننده به رگولاتور بوست سه فاز تغییرات ضریب توان به ازای بارهای مختلف و تغییرات فرکانس سوئیچینگ بررسی شده است.

۲- کنترل کننده حامل غیر خطی نمایی

کنترل کننده حامل غیرخطی نمایی در شکل (۱) نشان داده شده است. در این کنترل کننده وقتی فلیپ فلاپ RS "ست" شود. از جریان سوئیچ نمونه برداری کرده و پس از انتگرال گیری، سیگنال $V_q(t)$ ساخته می شود. از طرفی از ولتاژ خروجی نمونه برداری شده و سیگنال V_m که سیگنال خطای تقویت شده است را ایجاد می کند و پس از اعمال به مولد حامل غیرخطی، سیگنال $V_c(t)$ را به وجود می آورد. وقتی دو سیگنال $V_c(t)$ و $V_q(t)$ برابر شد فلیپ فلاپ RS سوئیچ را قطع می کند و با پالس بعدی دوباره عملیات تکرار می شود. سیگنال های $V_c(t)$ و $V_q(t)$ از روابط زیر محاسبه می شود [۶].



شکل ۲-: شکل موجهای نقاط مختلف کنترل کننده NLC

برای کاهش سخت افزار در مولد حامل غیرخطی می توان از سیگنال تقریبی نمایی استفاده نمود. چون ولتاژ خروجی میدل همواره بزرگتر از صفر است پس مولد با ضریب وظیفه بزرگتر از D_{min} کار می کند به همین دلیل معادله سیگنال حامل نمایی در فاصله $D_{min}T_s < t < T_s$ سیگنال اصلی $V_c(t)$ را دنبال می نماید. سیگنال حامل تقریب زده شده در معادله (۳) بیان شده است [۶].

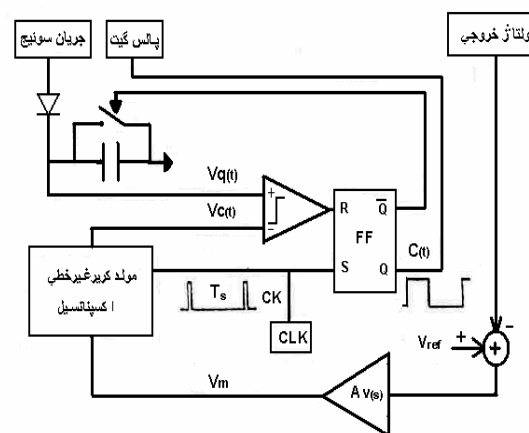
$$V_c^*(t) = \begin{cases} AV_m & 0 < t < D_{min} T_s \\ \frac{t \cdot D_{min} T_s}{\alpha T_s} & D_{min} T_s < t < T_s \\ AV_m e^{-\alpha t} & \end{cases} \quad (3)$$

در معادله (۳) ثابت زمانی تابع نمایی، تابعی از پریود سوئیچینگ و پارامتر α بوده و مقدار ثابتی است که دامنه نوسان حامل را مشخص می کند. سخت افزار مولد حامل غیرخطی مورد نظر شامل تقویت کننده با ضریب تقویت A ، سوئیچ، خازن و مقاومت موازی است به طوری که وقتی سوئیچ وصل شود در فاصله $0 < t < D_{min} T_s$ خازن به سرعت به اندازه AV_m شارژ می شود و وقتی سوئیچ قطع می شود خازن در مقاومت موازی دشارژ شده و سیگنال $V_c^*(t)$ را ایجاد می کند.

کنترل کننده حامل غیرخطی نمایی با فرکانس سوئیچینگ ۱۲۰۰ برابر فرکانس یکسو کننده طراحی شده و همان طور که در

$$V_q(t) = \frac{R_s}{R_e} \int_0^t i_s(\tau) d\tau \quad (1)$$

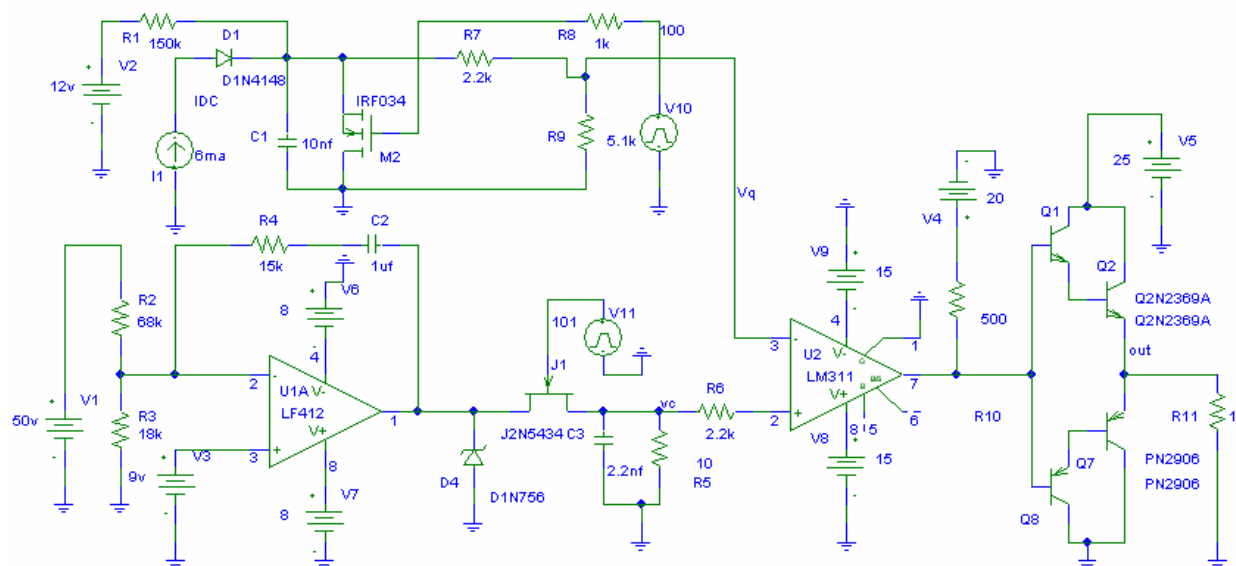
$$V_c(t) = V_m \frac{t}{T_s} (1 - \frac{t}{T_s}) \dots \dots 0 < t < T_s \quad (2)$$



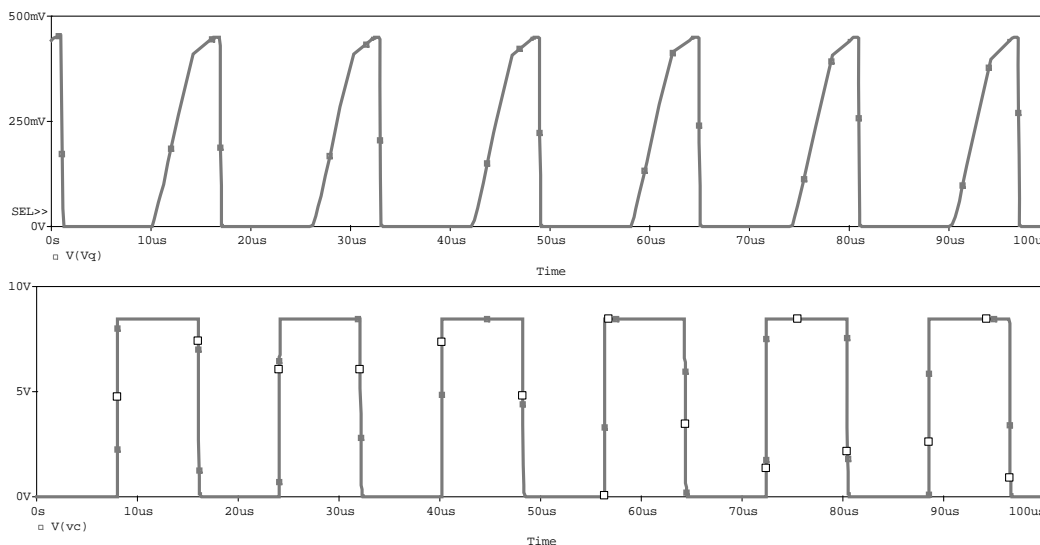
شکل ۱- بلوک دیاگرام کنترل کننده NLC

شکل موجهای ایده آلی که در نقاط مختلف کنترل کننده حامل غیرخطی ایجاد می شود در شکل (۲) نشان داده شده است. مولفه کلیدی در این کنترل کننده مولد حامل غیرخطی می باشد که باید سیگنال $V_c(t)$ را به (۲) ایجاد می کند.

شکل (۳) نشان داده شده شبیه‌سازی کامپیوتری سیگنال نقاط مختلف آن در شکل (۴) نشان داده شده‌است.



شکل ۳- مدار کنترل حامل غیر خطی با مولد نمایی



شکل ۴- الف: سیگنال حاصل از نمونه‌برداری از جریان $(V_q(t))$

ب: سیگنال خروجی مولد حامل غیر خطی $(V_c(t))$

۳- یکسوکننده تک‌فاز با رگولاتور نوع بوست و

کنترل‌کننده نمایی

در این قسمت کنترل‌کننده حامل غیرخطی نمایی را به یکسوکننده با رگولاتور بوست با مشخصات زیر اعمال شده‌است.

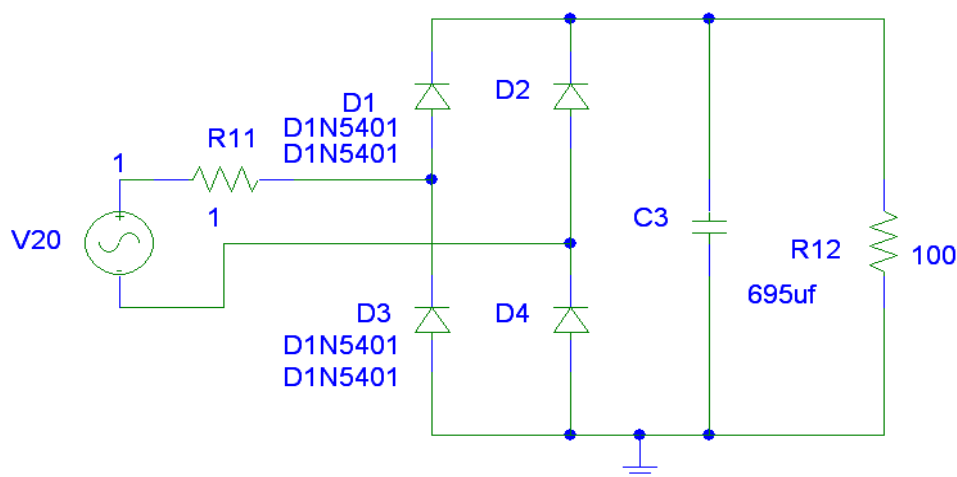
$$f_s = 62\text{KHz} \quad V_{20} = 120\text{v} \quad R_o = 100\Omega$$

$$L = 3\text{mH} \quad V_o = 385\text{v} \quad \Delta I = 0.5\text{A}$$

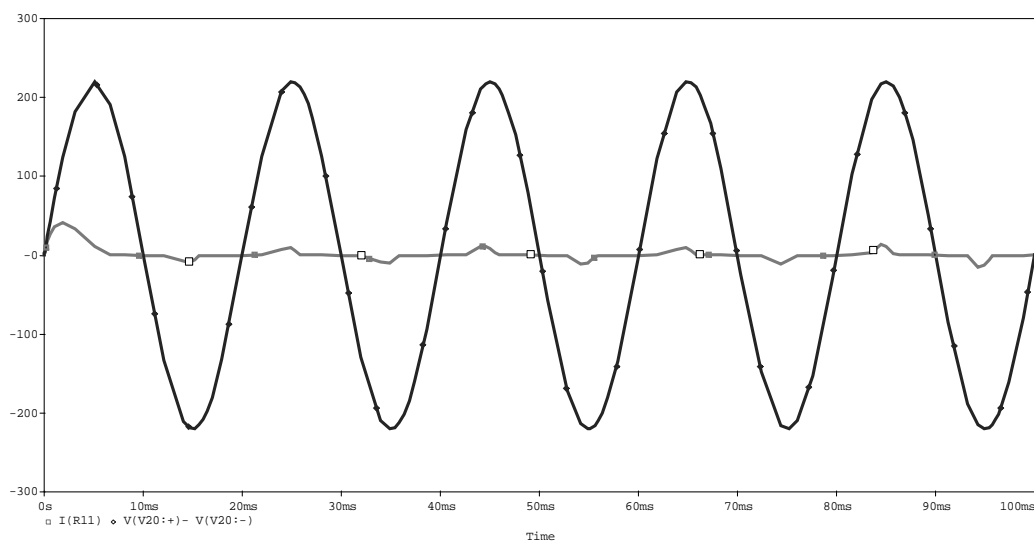
$$P_{OUT} = 240\text{W} \quad \Delta V_c = 50\text{mv} \quad C = 659\mu\text{F}$$

سپس با اعمال رگولاتور بوست و کنترل‌کننده به ازای تغییرات بارهای اهمی شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار Pspice انجام گردید و نتایج در شکل‌های (۷ و ۸) نشان داده شده‌است.

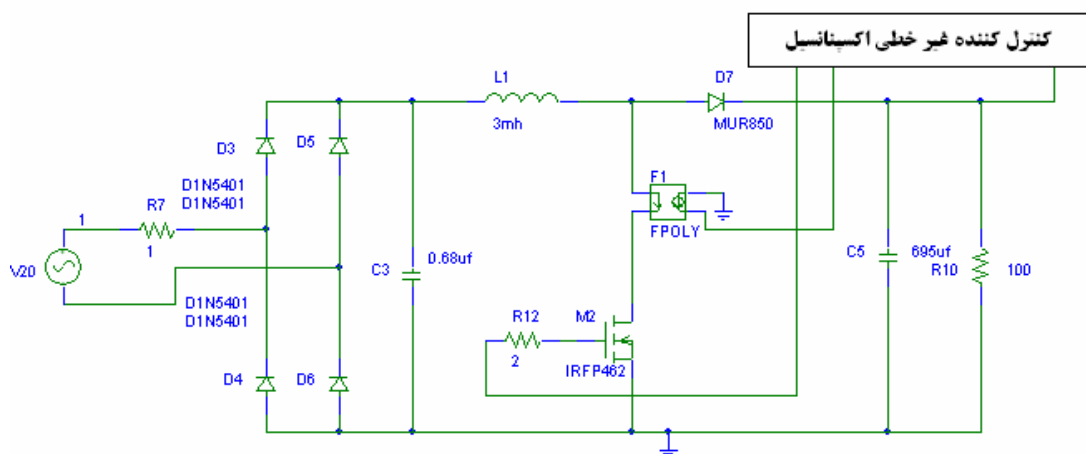
یکسوکننده تک‌فاز را قبل از اعمال کنترل‌کننده و رگولاتور بوست شبیه‌سازی کامپیوتری نموده و اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان ورودی حدود ۴۰ درجه و ضریب توانی حدود ۰/۷۶۶ به‌دست آمده، که در شکل‌های (۵ و ۶) نشان داده شده‌است.



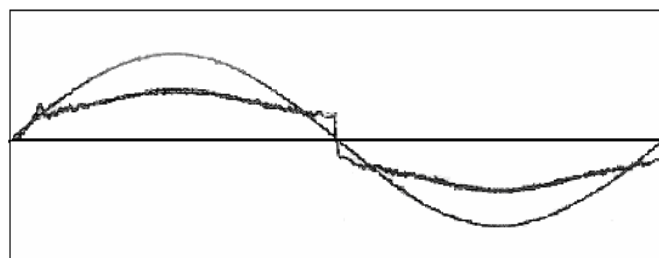
شکل ۵- یکسوکننده قبل از اعمال رگولاتور



شکل ۶- شکل موج‌های جریان و ولتاژ ورودی قبل از تصحیح ضریب توان



شکل ۷- یکسوکننده تک فاز با رگولاتور بوست و کنترل کننده NLC نمایشی

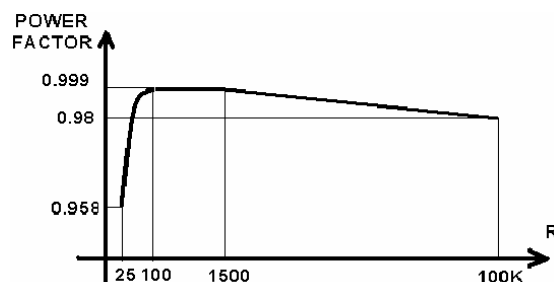


شکل ۸- شکل موجهای ولتاژ و جریان ورودی به ازای بار ۱۰۰ اهمی

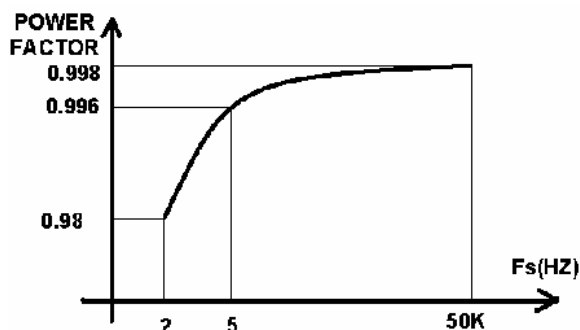
ضریب توان در محدوده ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ اهمی بیشترین مقدار خود را دارد و به ازای بارهای خیلی کم و خیلی زیاد جریان سلف بوست غیر عادی شده و باعث کاهش ضریب توان می شود. ولی دیده می شود در شرایط بارهای خیلی کم یا زیاد ضریب توان حدود ۰/۹۵ شده است که نشان دهنده عملکرد خوب کنترل کننده و یکسوکننده است.

یکسوکننده را به ازای تغییرات بارهای اهمی سوئیچینگ با فرکانس ۵۰۰ Hz و بار سلفی شدید (سلف و مقاومت سری که با دیود موازی معکوس شده است و با سوئیچ با فرکانس سوئیچینگ ۵۰۰ Hz سری شده است) شبیه سازی کامپیوتری شده و نتایج آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

به ازای تغییرات بار اهمی از ۲۵ اهم تا ۱۰۰ کیلو اهم منحنی تغییرات در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹- منحنی PF به ازای تغییرات بار در یکسوکننده تک فاز بوست



شکل ۱۱- منحنی PF به ازای تغییرات فرکانس سوئیچینگ

هر چه فرکانس سوئیچینگ به فرکانس یکسوکننده نزدیک شود نمونه برداری از ولتاژ خروجی و جریان سوئیچ کم شده در نتیجه شکل موج جریان ورودی از حالت ایده آل سینوسی خودش خارج می شود و هر چه فرکانس سوئیچینگ افزایش پیدا کند نمونه برداری ها بیشتر شده و شکل موج ایده آل تری را ایجاد می کند، ولی باعث افزایش تلفات در یکسوکننده و مبدل می شود. وقتی فرکانس سوئیچینگ کمتر از ۲۰ برابر فرکانس یکسوکننده می شود ضریب توان غیر قابل محاسبه می شود.

۴- یکسوکننده تک فاز با رگولاتور فلای بک و

کنترل کننده نمایی

برای ولتاژهای کمتر از ولتاژ ورودی اگر از رگولاتور باک استفاده کنیم ضریب توان کم می شود. برای افزایش ضریب توان می توان از رگولاتور فلای بک استفاده کرد. یکسوکننده با رگولاتور فلای بک با مشخصات زیر به کنترل کننده اعمال شده است.

$$f_s = 62 \text{ KHz}$$

$$L = 105 \mu\text{H}$$

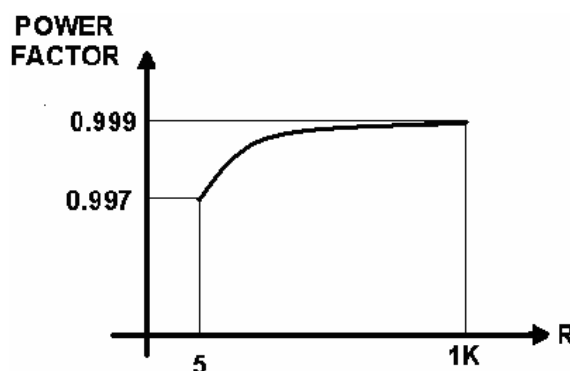
$$P_{OUT} = 150 \text{ W}$$

$$V_{in} = V_{20} = 120 \text{ V}_{rms}$$

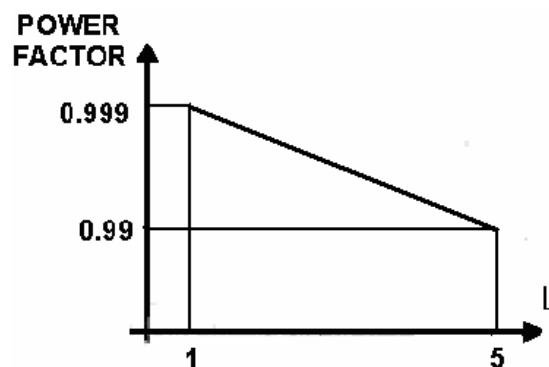
$$V_o = 50 \text{ V}$$

$$C = 2400 \mu\text{F}$$

یکسوکننده با رگولاتور فلای بک با مشخصات فوق که در شکل (۱۲) نشان داده شده را به ازای بارهای اهمی، بار سوئیچینگ و بار شدیداً سلفی توسط نرم افزار Pspice شبیه سازی و به ازای تغییرات وسیع فرکانس سوئیچینگ شبیه سازی شده است. منحنی تغییرات آنها در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



(الف)

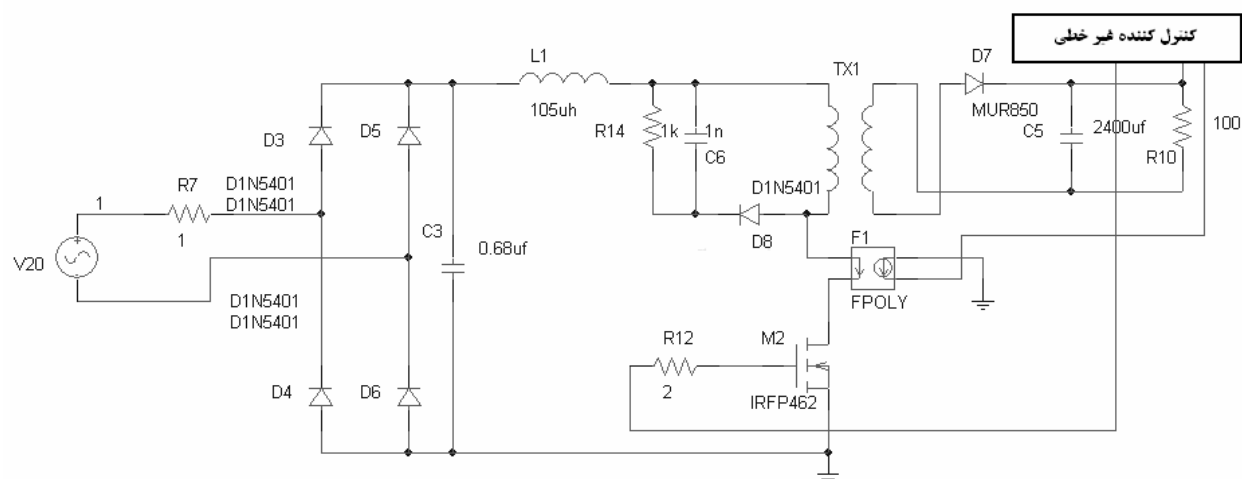


(ب)

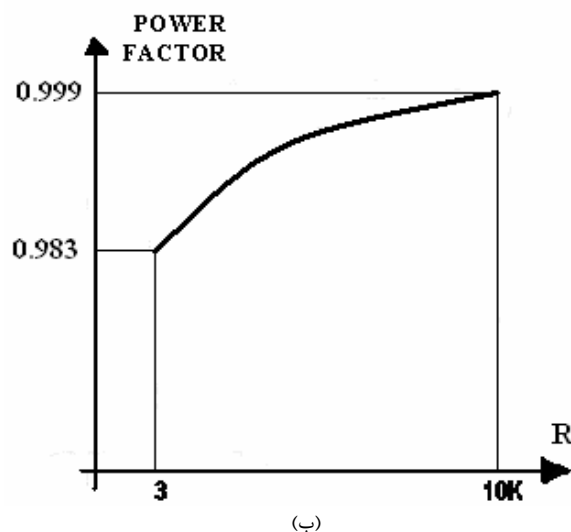
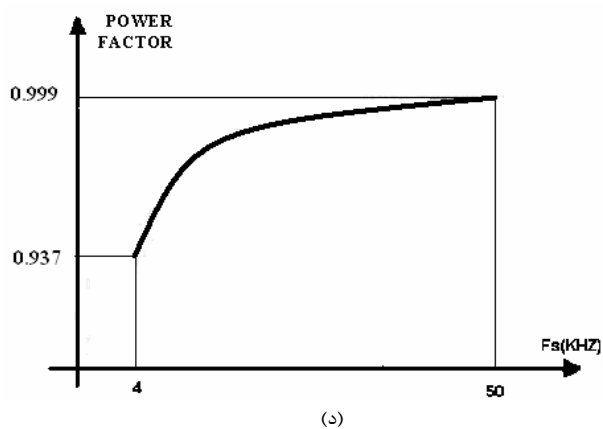
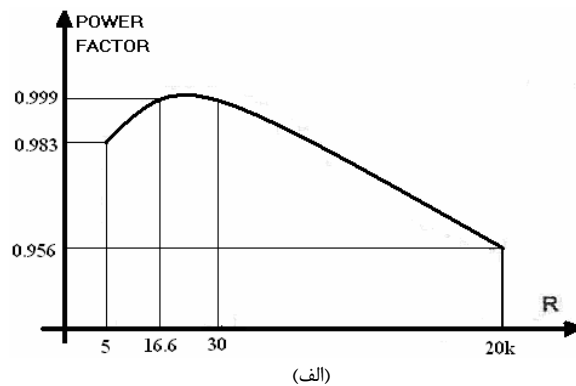
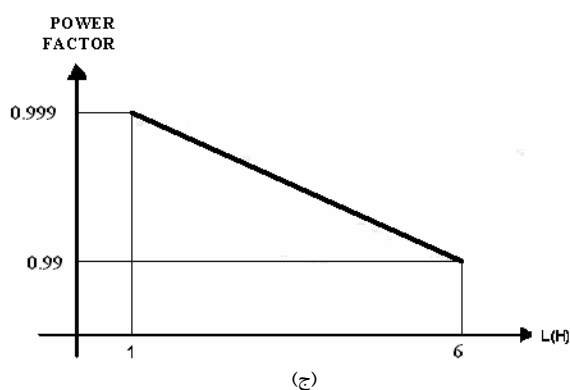
شکل ۱۰- الف: منحنی PF به ازای تغییرات بار سوئیچینگ
ب: منحنی PF به ازای تغییرات بار شدیداً سلفی

در شکل (۱۰- الف) منحنی تغییرات ضریب توان به ازای بارهای بسیار کم و بسیار زیاد نشان داده شده است. هرچه بار سوئیچینگ موازی با بار خروجی کم باشد حاصل توازی بار ۱۰۰ اهمی و بار سوئیچینگ کوچک شده و جریان سلف بوست بیشتر می شود و در اثر افزایش جریان سلف بوست جریان نمونه برداری شده توسط کنترل کننده تغییر کرده و باعث کاهش ضریب توان می شود و در حالت بار سوئیچینگ بسیار زیاد نیز مانند حالت قبل ضریب توان کاهش می یابد. در شکل (۱۰- ب) هرچه خاصیت سلفی افزایش پیدا کند ضریب توان کاهش می یابد.

در انتها فرکانس سوئیچینگ PFC را تا حدود ۲۰ برابر فرکانس یکسوکننده کاهش داده و منحنی تغییرات ضریب توان در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۲- یکسوکننده تک فاز همراه با رگولاتور فلی بک و کنترل کننده NLC



شکل ۱۳- الف: منحنی PF به ازای تغییرات بار اهمی ب: تغییرات بار سوئیچینگ ج: تغییرات بار شدیداً سلفی د: تغییرات فرکانس سوئیچینگ

می‌کند) و هر چه افزایش پیدا کند ضریب توان افزایش یافته ولی باعث افزایش تلفات مدار می‌شود.

۵- یکسوکننده سه فاز نوع بوست و کنترل کننده نمایی

یکسوکننده سه فاز با مشخصات زیر که در شکل (۱۴) نشان داده شده به کنترل کننده اعمال شده است.

$$V_{30} = V_{20} = V_{40} = 120V_{rms} \quad f_s = 6.2 \text{ KHz}$$

$$V_o = 600v \quad L_1 = 3.89 \text{ mH}$$

$$\Delta V_C = 0.5v \quad P_{OUT} = 1200W$$

$$\Delta I = 0.5 \text{ mA}$$

$$C_6 = 1374 \mu F$$

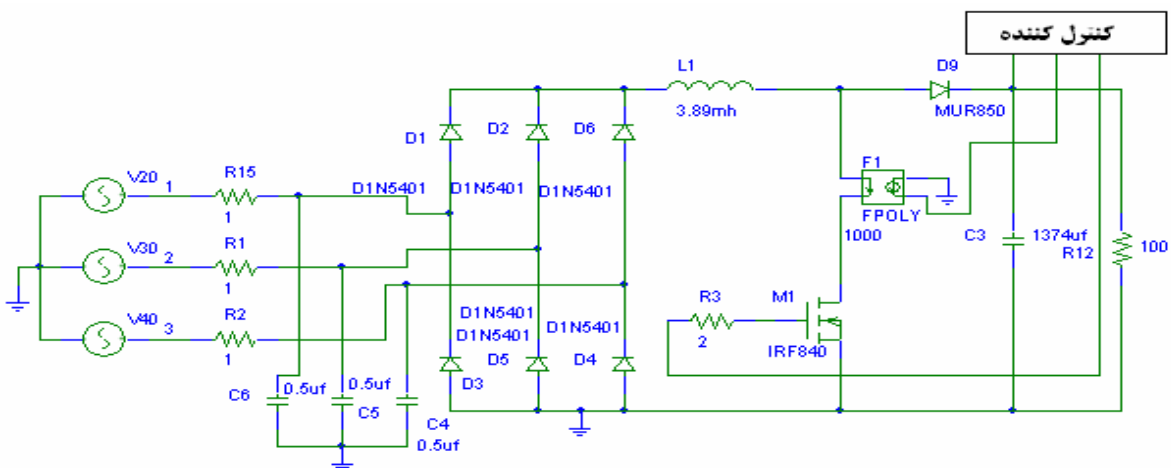
کنترل کننده و رگولاتور بوست به ازای بارهای اهمی مختلف بارهای سوئیچینگ، بار شدیداً سلفی و تغییرات فرکانس سوئیچینگ شبیه سازی کامپیوتری توسط نرم افزار Pspice انجام شده و نتایج آن در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

شکل (۱۳- الف) منحنی تغییرات را به ازای بارهای اهمی مختلف نشان می‌دهد. به ازای بارهای خیلی کم و خیلی زیاد ضریب توان کاهش پیدا می‌کند و به ازای بارهای بین ۱۶/۶ تا ۳۰ اهم ضریب توان حدوداً ۰/۹۹۹ است.

شکل (۱۳- ب) منحنی تغییرات را به ازای بارهای سوئیچینگ را نشان می‌دهد که به ازای بارهای خیلی کم ضریب توان کاهش می‌یابد چون تغییر غیر عادی در جریان فلای‌بک ایجاد می‌شود.

شکل (۱۳- ج) منحنی تغییرات به ازای تغییرات بار سلفی شدید را نشان می‌دهد، هر چه سلف افزایش پیدا کند ضریب توان به خاطر افزایش خاصیت سلفی کاهش پیدا می‌کند.

شکل (۱۳- د) تغییرات فرکانس سوئیچینگ کنترل کننده تا حدود ۶۰ برابر فرکانس مدار را نشان می‌دهد، هر چه فرکانس سوئیچینگ کمتر شود ضریب توان کاهش پیدا می‌کند (چون دفعات نمونه برداری از ولتاژ خروجی و جریان سوئیچ کاهش پیدا



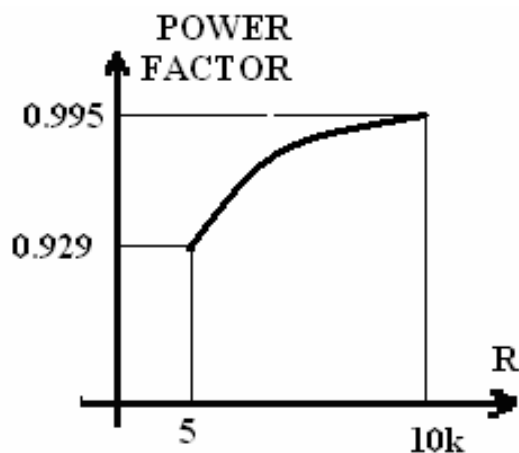
شکل ۱۴- یکسوکننده سه فاز نوع بوست و کنترل کننده NLC نمایی

باعث افزایش ضریب توان می‌شود و هر چه بار سوئیچینگ کاهش یابد ضریب توان کاهش پیدا می‌کند.

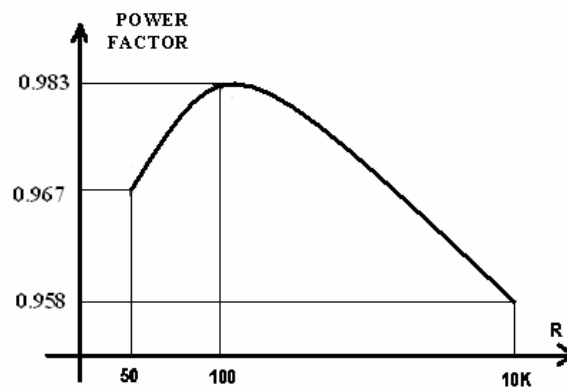
شکل (۱۵- ج) منحنی تغییرات یکسوکننده سه فاز به ازای بار شدیداً سلفی را نشان می‌دهد هر چه بار سلفی افزایش می‌یابد باعث کاهش ضریب توان می‌شود.

شکل (۱۵- الف) منحنی تغییرات یکسوکننده به ازای بارهای اهمی مختلف را نشان داده است. به طوری که به ازای بارهای خیلی کوچک و بارهای خیلی بزرگ ضریب توان به علت تغییر جریان در سلف بوست کاهش پیدا می‌کند و بهترین ضریب توان بین بارهای ۹۰Ω تا ۱۵۰Ω یعنی حدود ۰/۹۸۳ می‌باشد.

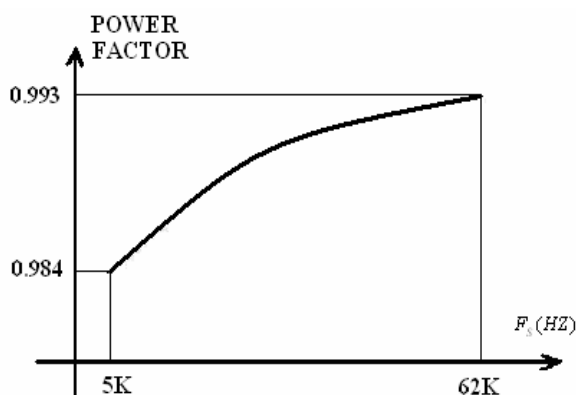
شکل (۱۵- ب) منحنی تغییرات یکسوکننده به ازای بارهای سوئیچینگ مختلف را نشان می‌دهد که هر چه بار سوئیچینگ افزایش پیدا می‌کند حاصل توازی بار اهمی خروجی و بار سوئیچینگ برابر بار خروجی قبل از اتصال بار سوئیچینگ شده و



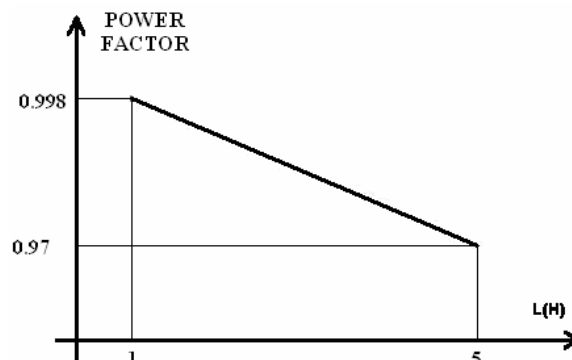
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۵- الف: منحنی PF به ازای تغییرات بار اهمی ب: منحنی PF به ازای تغییرات بار سوئیچینگ ج: منحنی PF به ازای تغییرات بار سلفی شدید د: منحنی PF به ازای تغییرات فرکانس سوئیچینگ

۶- نتایج

در این مقاله کنترل کننده حامل غیرخطی نمایی طراحی و شبیه سازی شده است و این کنترل کننده به یکسوکننده های تک فاز و سه فاز نوع بوست اعمال شده که نتایج زیر را شامل می شود.

۱- کنترل کننده حامل غیرخطی نمایی از نظر سخت افزاری خیلی ساده تر از کنترل کننده های دیگر بوده و چون از انتگرال جریان سوئیچ در نمونه برداری استفاده شده مانند کنترل کننده حامل غیرخطی شارژ دارای نویز کمتری است ولی به تغییرات لحظه ای جریان عکس العمل سریع نشان نمی دهد.

۲- تغییرات فرکانس سوئیچینگ در رگولاتورهای بوست و فلاپی بک تا مرز ۲۰ برابر فرکانس یکسوکننده قابل قبول است در صورتی که

شکل (۱۵-د) منحنی تغییرات یکسوکننده سه فاز به ازای تغییرات فرکانس سوئیچینگ نشان داده شده است، به ازای کاهش فرکانس سوئیچینگ تا حدود ۱۰۰ برابر فرکانس یکسوکننده شکل موج جریان ورودی حالت عادی خودش را دارد و ضریب توان کاهش می یابد. ولی وقتی فرکانس سوئیچینگ کمتر از ۱۰۰ برابر فرکانس مدار می شود شکل موج جریان از حالت عادی خارج و پالسهای گیت آن نیز خراب می شود اگر فرکانس سوئیچینگ افزایش یابد شکل موج جریان حالت عادی تری داشته ولی تلفات مدار زیاد می شود.

در رگولاتور بوست سه فاز کمتر از ۱۰۰ برابر فرکانس یکسوکننده عمل نمی‌کند.

۳- یکسوکننده به ازای بارهای سوئیچینگ در فرکانس‌های معمول عملکرد مناسبی داشته حتی در بارهای شدیداً سلفی مانند (موتور DC) به خوبی عمل می‌کند.

۴- یکسوکننده به ازای بارهای اهمی بسیار سبک و بسیار سنگین نسبت به بار نامی تصحیح را به خوبی انجام نمی‌دهند.

۵- هر چه فرکانس سوئیچینگ رگولاتور بالاتر باشد تصحیح بهتر انجام می‌شود ولی تلفات مدار افزایش می‌یابد.

۷- مراجع

- [1] J. W. Dixon, B. T. Ooi, "Indirect Current Control of A Unity Power Factor Sinusoidal Current Boost Type Three-Phase Rectifier", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 35, No. 4, 1988, pp.508-514.
- [2] D. Maksimovic, Y. Jang, "Nonlinear -Carrier Control for High-Power Factor Boost Rectifiers", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 11, No. 4, July 1996, pp.578-584.
- [3] J. W. Kolar, F. C. Zach, "A Novel Three-Phase Utility Interfaceminimizing Line Current Harmonics of High-Power Telecommunications Rectifier Modules ", IEEE Trans Industrial Electron. Vol. 44, No. 4, Aug. 1997, pp.456-567.
- [4] E. L. M.Mehl, I. Barbi, "An Improved High-Power Factor and Low Cost Three Phase Rectifier", IEEE Trans. Ind. Electron., Applications. Vol. 33, No. 2, March / April 1997, pp.485-492.
- [5] J. Bazint, J. A. Oconner, "Analysis and Design of A Zero Voltage Transition Circuit", In Proc. IEEE APEC 1994, pp.591-597.
- [6] R. Zane, D. Maksimovic, "Nonlinear-Carrier Control for High-Power-Factor Rectifiers Based on Up-Down Switching Converters", IEEE. Trans. power Electron., Vol. 13, No. 2, March 1998, pp.213-221.

۸- پی‌نوشتها

-
- 1- Power Factor Correction
 - 2- Average Current NLC Controller
 - 3- Charge NLC Controller
 - 4- Peak Current NLC Controller