

Online Algorithm for Damping DC Offset Removal from Fault Currents

Ali Rezavand ^{1,*}

¹Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University of Mashhad, Mashhad, Iran

E-mails: alirezavand384@gmail.com

* Corresponding Author

Abstract

This paper presents an efficient and innovative method to remove the damping DC offset from fault currents in power systems. In this method, the instantaneous value of the damped DC offset is obtained using exact integration of the input signal. After calculating this value, the DC component is effectively removed by subtracting the instantaneous DC value from the original signal at each sampling instant. After this step, Discrete Fourier Transform (DFT) is applied to the signal without offset to extract the phasor of the principal component of the fault current. This method is capable of separating transient and error signals with high accuracy. In this research, to evaluate the efficiency of the proposed method, various transient signals including single-phase and multi-phase faults have been investigated in different network conditions. The results of the simulations show that this proposed method is not only highly accurate, but its implementation is also easier and faster than other methods. These characteristics make the proposed method as a practical and effective solution for use in power protection and measurement systems. Other advantages of this method include reducing the computational complexity and improving the response time of the system, which is especially important in industrial environments and large power systems.

Keywords

DC offset damping, fault currents, impedance relays, fundamental frequency component.

الگوریتم برخط برای حذف آفست DC میرا شونده از جریان های خطا

علی رضواند^{۱*}

گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد مشهد، مشهد، ایران

ایمیل نویسنده: alirezavand384@gmail.com

چکیده

این مقاله یک روش کارآمد و نوآورانه را برای حذف آفست DC میرا شونده نمایی از جریان های خطا در سیستم های قدرت ارائه می دهد. در این روش، مقدار لحظه ای آفست DC میرا شونده با استفاده از انتگرال گیری دقیق از سیگنال ورودی به دست می آید. پس از محاسبه این مقدار، مؤلفه DC به طور مؤثر با تفریق مقدار لحظه ای DC از سیگنال اصلی در هر لحظه نمونه برداری حذف می شود. پس از این مرحله، تبدیل فوریه گسسته (DFT) بر روی سیگنال بدون آفست اعمال می شود تا فازور مؤلفه اصلی جریان خطا استخراج شود. این روش با دقت بالا قادر به تفکیک سیگنال های گذرا و خطا است. در این پژوهش، برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، سیگنال های گذرای مختلف شامل خطاهای تک فاز و چندفاز در شرایط مختلف شبکه بررسی شده اند. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که این روش پیشنهادی نه تنها از دقت بالایی برخوردار است، بلکه پیاده سازی آن نیز نسبت به سایر روش ها آسان تر و سریع تر است. این ویژگی ها باعث می شود که روش پیشنهادی به عنوان یک راه حل عملی و مؤثر برای استفاده در سیستم های حفاظتی و اندازه گیری برق پیشنهاد شود. از مزایای دیگر این روش می توان به کاهش پیچیدگی محاسباتی و بهبود زمان پاسخ سیستم اشاره کرد که در محیط های صنعتی و سیستم های قدرت بزرگ اهمیت ویژه ای دارد.

کلمات کلیدی: آفست DC میرا شونده، جریان های خطا، رله های امپدانس، مؤلفه فرکانس اصلی

نام نویسنده مسئول: علی رضواند

ایمیل نویسنده مسئول: alirezavand384@gmail.com

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴

تاریخ (های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۰

۱- مقدمه

سیگنال های ورودی برای اندازه گیری های مختلف در کاربردهای حفاظت شامل نویزهایی مانند آفست DC و هارمونیک هستند که باید فیلتر شوند تا سیگنال فرکانس اصلی مورد نیاز حفظ شود [۱-۳]. تبدیل فوریه گسسته (DFT) و استفاده از روش های مختلف فازی، یک روش پر استفاده است می تواند هارمونیک ها را با استفاده از محاسبات ساده از هم جدا کند. با این وجود، در طول هر بازه خطا، سیگنال های ولتاژ و جریان دارای هارمونیک ها و آفست DC بزرگی هستند [۵-۷]. آفست DC به شدت مانع یافتن یک سیگنال فرکانس اصلی صحیح می شود و زمان همگرایی را به تأخیر می اندازد. به علاوه، وقتی سیگنال تحلیل شده شامل یک آفست DC میرا شونده نمایی باشد، فازور تخمین زده شده با استفاده از DFT می تواند خطایی تا ۱۵٪ داشته باشد [۸-۱۰]. این مقدار برای رله های حفاظتی قابل قبول نیست. روش های مختلفی برای حذف آفست DC میرا شونده توسعه یافته اند [۱۱-۱۴]. برخی روش ها دارای مشکلات تخمین هستند یا خروجی نوسانی به صورت تابعی از ثابت زمانی مؤلفه نمایی سیگنال دارند [۱۵، ۱۶]. روش های دیگر یا پیچیده هستند که بنابراین برای استفاده زمان واقعی در یک وسیله دیجیتال نامناسب هستند یا به بیش از یک بازه نیاز دارند [۱۷، ۱۸].

این مقاله روشی را برای حذف آفست DC میرا شونده نمایی واقعی از جریان های خطا ارائه می کند. روش پیشنهادی، با DFT متداول سیکل کامل و روش های توسعه یافته جدید برای بدست آوردن سیگنال های فرکانس اصلی مقایسه شده است. این روش برای محاسبه و حذف آفست DC به تعداد نمونه های کم (۱۰ نمونه) و تأخیر دقیقاً یک سیکل نیاز دارد.

۲- روش پیشنهادی

با در نظر گرفتن اینکه جریان خطا شامل مؤلفه های اصلی، هارمونیک و DC میرا شونده است، جریان خطا می تواند به لحاظ ریاضی به این صورت محاسبه شود

$$i(t) = Ae^{-t/\tau} + \sum_{k=1}^M A_k \cos(k\omega_1 t + \varphi_k) \quad (1)$$

که در آن، A دامنه مؤلفه DC میرا شونده است، M حداکثر مرتبه هارمونیک است، τ ثابت زمانی است، ω_1 فرکانس زاویه ای مؤلفه اصلی است و A_k و φ_k به ترتیب دامنه و زاویه هارمونیک k هستند.

جمله دوم (۱)، متناوب است و دارای ویژگی های توابع متناوب می باشد، یعنی اختلاف بین دو نمونه جدا شده در زمان با یک دوره فرکانس اصلی (T) صفر است. در همین حال، این جمله ترکیبی از توابع مثلثاتی است، لذا انتگرال آن در طول یک بازه نیز صفر می باشد. اعمال این ویژگی ها به (۱) معادلات زیر را می دهد:

$$i(t+T) - i(t) = Ae^{-(t+T)/\tau} - Ae^{-t/\tau} = Ae^{-t/\tau}(e^{-T/\tau} - 1) = x(t) \quad (2)$$

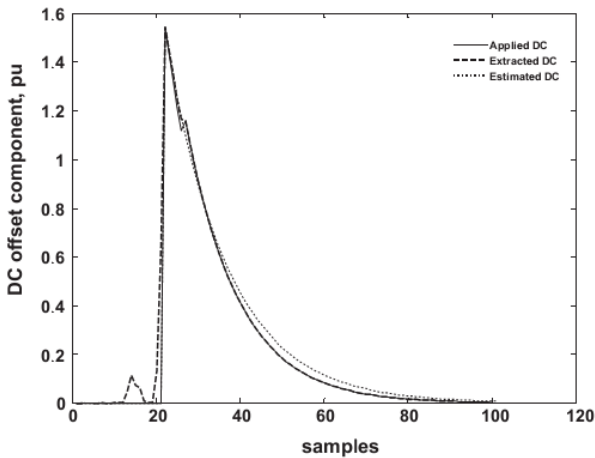
انتگرال گیری از رابطه (۱) نتیجه می دهد

$$u(t) = \int i(t) dt = \int \left(Ae^{-t/\tau} + \sum_{k=1}^M A_k \cos(k\omega_1 t + \varphi_k) \right) dt = -Ate^{-t/\tau} + \sum_{k=1}^M \frac{A_k}{k\omega_1} \sin(k\omega_1 t + \varphi_k) + \text{Constant} \quad (3)$$

مؤلفه دوم معادله (۳) نیز متناوب است، بنابراین

$$u(t+T) - u(t) = \int_t^{t+T} Ae^{-t/\tau} dt = (-Ate^{-t/\tau}) \Big|_t^{t+T} = -Ate^{-(t+T)/\tau} + Ate^{-t/\tau} = -Ate^{-t/\tau}(e^{-1} - 1) = y(t) \quad (4)$$

روش برای فرکانس غیر نامی نیز تست شده است. نتایج جدول ۱ که برای $I_f/I_{dc}=0.6$ و $\tau=25ms$ و $50ms$ فراهم شده اند، نشان می دهند که روش پیشنهادی، مؤلفه اصلی جریان خطا را در حالت تغییر فرکانس با حداکثر خطای حدود $2/46\%$ در فرکانس سیستم $49/8$ و 25 ، به طور کارآمد استخراج می کند.

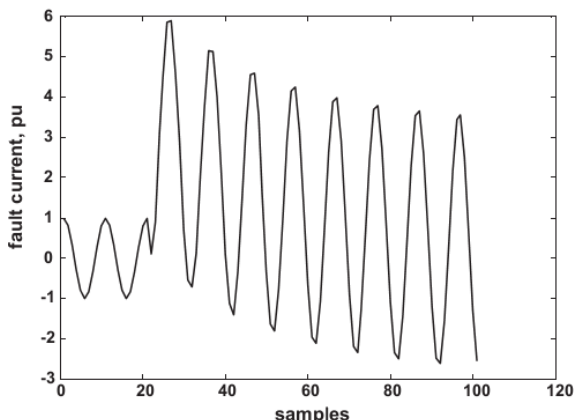


شکل ۱. آفست های DC حذف شده و استخراج شده

جدول ۱. تغییرات اندازه بدست آمده با فرکانس غیر اسمی

τ (ms)	I_{dc}/I_f	The frequency of input signal (Hz)				
		49.8	49.9	50	50.1	50.2
25	Min A_1	2.9262	2.9602	3.000	2.9817	2.9708
	Max A_1	3.0659	3.0079	3.000	3.0123	3.0174
50	Min A_1	2.9525	2.9758	3.000	2.9889	2.9795
	Max A_1	3.0165	3.0094	3.000	3.0126	3.0182

روش پیشنهادی در شکل ۲ به یک جریان خطای 50 Hz اعمال شد. این سیگنال، یک جریان فاز از یک خطای سه فاز بدست آمده توسط نرم افزار ATP-EMTP است. شکل ۳، مؤلفه آفست DC استخراج شده را نشان می دهد. شروع استخراج مقدار DC از ظاهر اولیه مؤلفه میرا شونده DC، یک سیکل طول می کشد. پس از حذف آفست DC از جریان ورودی، جریان AC حوزه زمان سیگنال اعمالی، مانند شکل ۴ استخراج شده است. دامنه مؤلفه اصلی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی مانند شکل ۵ محاسبه شده است. به عنوان مقایسه، نتایج اعمال DFT متداول و روش مبتنی بر انتگرال گیری یک سیکل [۴] نیز فراهم شده اند. DFT متداول و روش مبتنی بر انتگرال گیری یک سیکل دارای یک نوسان در مؤلفه اصلی بودند و نیاز به زمان بیشتری برای بدست آوردن یک خروجی پایدار داشتند.



شکل ۲. سیگنال اعمال شده

طبق (۲) و (۴)، اگر مقدار جریان خطا و انتگرال آن در طول هر بازه از زمان t تا $t+T$ موجود باشد، معادله زیر می تواند برای محاسبه ثابت زمانی (τ) در هر لحظه به کار رود

$$\tau(t) = -\frac{y(t)}{x(t)} \quad (5)$$

با استفاده از معادلات (۲) و (۵)، مقدار لحظه ای آفست DC می تواند به این صورت محاسبه شود:

$$Ae^{-t/\tau(t)} = -\frac{x(t)}{e^{-T/\tau(t)} - 1} \quad (6)$$

در (۵) و (۶)، $x(t)$ و $y(t)$ به ترتیب از جریان خطای اندازه گیری شده و انتگرال گیری شده در لحظات (t) و ($t+T$) بدست می آیند. مؤلفه DC واقعی بدست آمده، از سیگنال ورودی کم می شود و DFT می تواند برای استخراج مؤلفه اصلی به نتیجه اعمال شود.

با استفاده از رابطه (۵)، ثابت زمانی از دید عملی می تواند بدون بار محاسباتی و بدون بسط سری تیلور محاسبه شود که برای بدست آوردن نتایج دقیق نیاز به نمونه های زیادی دارد تا بازه نمونه برداری (Δt) بسیار کوچکتر از ثابت زمانی سیستم قدرت شود.

از سوی دیگر، آفست DC می تواند از داده های اولین دوره اصلی تخمین زده شده و از جریان خطای اصلی در لحظه نمونه برداری کم شود. مقدار DC در زمان t با یک ثابت زمانی و سیگنال اصلی جریان خطا از رابطه (۲)، محاسبه می شود. مقدار DC برای لحظه نمونه برداری بعدی می تواند با ضرب مقادیر DC قبلی در یک افزایش نمایی به صورت زیر محاسبه شود

$$Ae^{-t/\tau} = \frac{x(t)}{(e^{-T/\tau} - 1)} \quad (7)$$

$$Ae^{-(t+\Delta t)/\tau} = \frac{x(t+\Delta t)}{(e^{-T/\tau} - 1)} = Ae^{-t/\tau} Ae^{-\Delta t/\tau} = \frac{x(t)}{(e^{-T/\tau} - 1)} e^{-\Delta t/\tau} \quad (8)$$

با این وجود، برای اعمال الگوریتم پیشنهادی به جریان خطا و تخمین آفست DC، یک سیکل از داده های نمونه باید موجود باشد. ثابت زمانی مؤلفه DC میرا شونده می تواند با اعمال $t=0$ به (۵) محاسبه شود. بنابراین، معادله زیر بدست می آید:

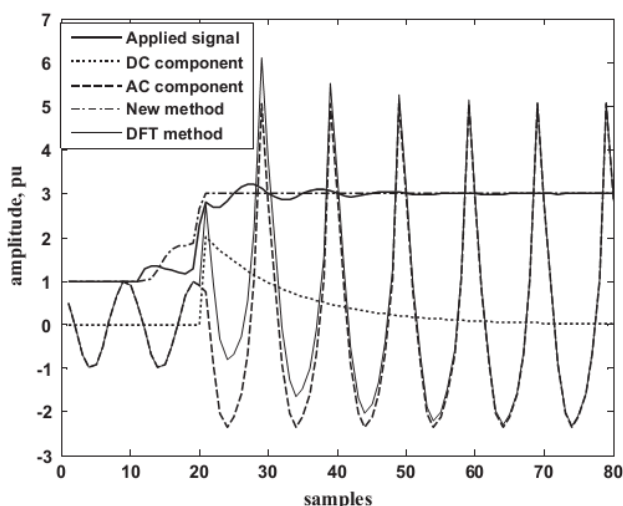
$$\tau = -\frac{y(0)}{x(0)} = \frac{u(T)-u(0)}{i(T)-i(0)} \quad (9)$$

در معادله (۹)، لحظه ای که جریان خطا رخ می دهد، باید تشخیص داده شده باشد. با دانستن ثابت زمانی و اعمال معادلات (۷) و (۸)، مقدار DC می تواند مستقیماً در لحظه نمونه برداری محاسبه شود.

بنابراین، برای اعمال الگوریتم پیشنهادی به جریان خطا و تخمین آفست DC، باید یک سیکل از داده های نمونه برداری موجود باشد. آفست DC تخمین زده شده می تواند از سیگنال اصلی کم شود و سپس، DFT می تواند برای استخراج مؤلفه اصلی به نتیجه اعمال گردد.

۳- نتایج و بحث

روش پیشنهادی برای چند سیگنال نمونه برداری شده و شبیه سازی شده، تست شده است که شامل مؤلفه DC با τ و نسبت های مؤلفه های اصلی و DC (I_f/I_{dc}) مختلف می باشند. نرخ نمونه برداری در ۱۰ نمونه بر سیکل تنظیم شده است. شکل ۱، آفست DC استخراج شده، تخمین زده شده و اعمال شده برای یک جریان خطای شبیه سازی شده 50 Hz را نشان می دهد که در آن، سیگنال شامل دو مؤلفه DC با $I_f/I_{dc}=0.6, 1$ و $\tau=25ms$ است. این نتیجه نشان می دهد که روش پیشنهادی سازگاری بسیاری بهتری برای آفست DC استخراج شده نسبت به آفست DC تخمین زده شده با انتگرال گیری یک سیکل دارد. این



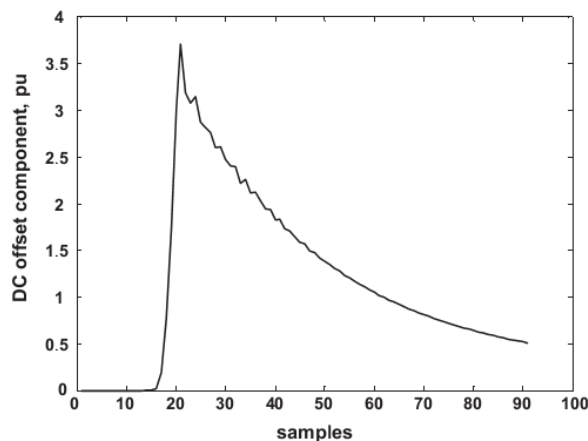
شکل ۶. کاربرد روش پیشنهادی بر جریان خطای دارای هارمونیک

۴- نتیجه گیری

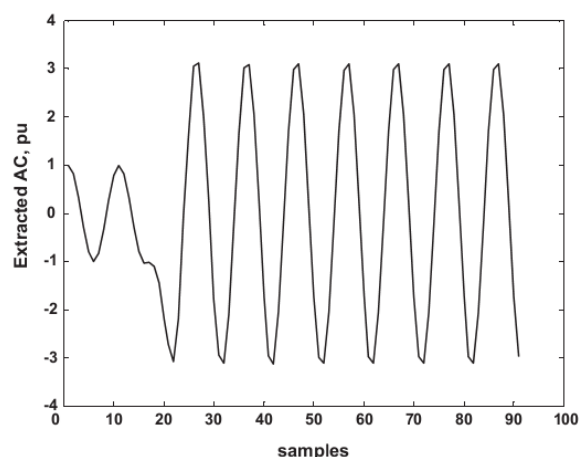
یک الگوریتم برخط برای حذف آفست DC از جریان خطا ارائه شده است. این روش، مؤلفه DC واقعی را با یک تأخیر یک سیکل اصلی به دقت از جریان های خطا استخراج می کند. نتایج شبیه سازی نشان می دهند که الگوریتم پیشنهادی دارای همگرایی سریع تر و دقت بهتری نسبت به DFT متداول و روش مبتنی بر انتگرالی گیری یک سیکل می باشد.

مراجع

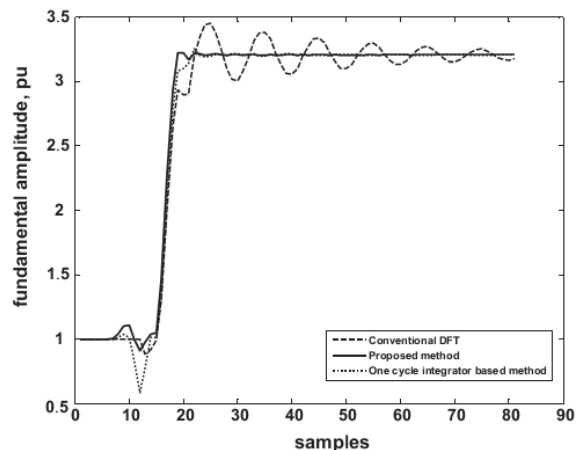
- [1] Min KW, Santoso S. DC offset removal algorithm for improving location estimates of momentary faults. IEEE Transactions on Smart Grid. 2017 Mar 29;9(6):5503-11.
- [2] Gopalan SA, Mishra Y, Sreeram V, Iu HH. An improved algorithm to remove DC offsets from fault current signals. IEEE Transactions on Power Delivery. 2016 Oct 4;32(2):749-56.
- [3] Achlerkar PD, Panigrahi BK. Assessment of DC offset in fault current signal for accurate phasor estimation considering current transformer response. IET Science, Measurement & Technology. 2019 May;13(3):403-8.
- [4] Mohammadi S, Mahmoudi A, Kahourzade S, Yazdani A, Shafiullah GM. Decaying DC offset current mitigation in phasor estimation applications: A review. Energies. 2022 Jul 20;15(14):5260.
- [5] Shukla SK, Koley E, Ghosh S. DC offset estimation-based fault detection in transmission line during power swing using ensemble of decision tree. IET Science, Measurement & Technology. 2019 Mar;13(2):212-22.
- [6] Shirkhani M, Karimizad SS, Dadvand Z. Proof of stability of linear and non-linear TSK type-2 fuzzy systems. Computational methods in engineering sciences. 2023 May 22;1(1):5-10.
- [7] Abdali A, Monjezi V. Machine Learning-based Flexible Link Robot Control. Computational methods in engineering sciences. 2023 Aug 23;1(2):12-7.
- [8] Attaianese C, D'Arpino M, Di Monaco M, Di Noia LP. Model-based detection and estimation of dc offset of phase current sensors for field oriented pmsm drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2022 Jul 26;70(6):6316-25.
- [9] Nam SR, Park JY, Kang SH, Kezunovic M. Phasor estimation in the presence of DC offset and CT saturation. IEEE transactions on power delivery. 2009 Sep 22;24(4):1842-9.
- [10] Hooshyar A, Sanaye-Pasand M. Accurate measurement of fault currents contaminated with decaying DC offset and CT saturation. IEEE Transactions on Power Delivery. 2012 Jan 10;27(2):773-83.
- [11] Gu JC, Yu SL. Removal of DC offset in current and voltage signals using a novel Fourier filter algorithm. IEEE Transactions on Power Delivery. 2000 Jan;15(1):73-9.
- [12] Kang SH, Lee DG, Nam SR, Crossley PA, Kang YC. Fourier transform-based modified phasor estimation method immune to the effect of the DC offsets. IEEE Transactions on Power Delivery. 2009 Jun 23;24(3):1104-11.
- [13] Kumar BR, Kumar A. Mitigation of the DC offset by a sub-cycle sample method M-Class PMUs. IEEE Transactions on Power Delivery. 2019 Jan 11;34(2):780-3.



شکل ۷. آفست های DC استخراج شده



شکل ۸. مقادیر AC جریان خطا



شکل ۹. مقدار اندازه عناصر اساسی

برای نشان دادن اینکه روش پیشنهادی قادر به کار در حضور هارمونیک ها می باشد، روش پیشنهادی به یک جریان خطای آلوده به هارمونیک شبیه سازی شده طبق معادله (۱) اعمال شده است که در آن، $M=7$ ، $A=2pu$ ، $\tau=25ms$ و $\phi_k=k\phi_1$ ، $A_k=A_1/k$ ، $\phi_1=\pi/3$ rad، $A_1=1pu$ که در حالت حضور هارمونیک ها، مؤلفه آفست DC به صورت دقیق استخراج می شود. مؤلفه های اصلی و AC جریان خطا نیز کاملاً محاسبه شده اند.

- [14] Abdoos AA, Gholamian SA, Farzinfar M. Accurate and fast DC offset removal method for digital relaying schemes. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2016 May;10(8):1769-77.
- [15] Yang JZ, Liu CW. Complete elimination of DC offset in current signals for relaying applications. In 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37077) 2000 Jan 23 (Vol. 3, pp. 1933-1938). IEEE.
- [16] Mai RK, Fu L, Dong ZY, Kirby B, Bo ZQ. An adaptive dynamic phasor estimator considering DC offset for PMU applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2011 Apr 7;26(3):1744-54.
- [17] Ma X, Liao Z, Wang Y, Zhao J. Fast dynamic phasor estimation algorithm considering DC offset for PMU applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2023 Jun 14;38(5):3582-93.
- [18] Eisa AA, Ramar K. Removal of decaying DC offset in current signals for power system phasor estimation. In 2008 43rd International Universities Power Engineering Conference 2008 Sep 1 (pp. 1-4). IEEE.