

고차 구성의 개선된 직류 오프셋 제거 필터

Advanced DC Offset Removal Filter of High-order Configuration

박철원*
(Chul-Won Park)

Abstract - Fault currents are expressed as a combination of harmonic components and exponentially decaying DC offset components, during the occurrence of fault in power system. The DC offset components are included, when the voltage phase angle of fault inception is closer to 0° or 180° . The digital protection relay should be detected quickly and accurately during the faults, despite of the distortions of relaying signal by these components. It is very important to implement the robust protection algorithm, that is not affected by DC offset and harmonic components, because most relaying algorithms extract the fundamental frequency component from distorted relaying signal. So, In order to high performance in relaying, advanced DC offset removal filter is required. In this paper, a new DC offset removal filter, which is no need to preset a time constant of power system and accurately estimate the DC offset components with one cycle of data, is proposed, and compared with the other filter. In order to verify performance of the filter, we used collecting the current signals after synchronous machine modeling by ATPDraw5.7p4 software. The results of simulation, the proposed DC offset removal filter do not need any prior information, the phase delay and gain error were not occurred.

Key Words : ATPDraw, DC offset removal filter, Fault currents, Gain error, Harmonic components, Phase delay, Synchronous machine

1. 서론

전력계통사고에 따른 고장전류는 고조파성분(harmonic components)과 지수함수적으로 감쇠하는 직류오프셋성분(DC offset component)의 조합으로 표현된다. 고조파성분은 전압 위상각이 90° 혹은 270° 에 가까울수록 뚜렷해지고, 직류오프셋성분은 전압위상각이 0° 또는 180° 에 가까울수록 현저해진다. 그러므로 디지털 보호계전기는 이런 성분들에 의한 계전신호의 왜곡에도 불구하고 계통사고를 신속하고 정확하게 감지하여야 한다[1].

이를 위해 다양한 기법들이 모색되어 왔다. 지역통과 필터의 경우 고조파성분은 대부분 차단할 수 있으나 직류오프셋 성분은 전혀 제거되지 않았다. 대역통과 필터의 경우 시지연의 문제로 억제 및 통과주파수 대역을 정확히 구별하기 어려운 관계로 저주파수 대역의 고조파성분이 많이 포함되었을 때는 큰 오차를 포함하게 된다[2]. 직교변환의 경우 매우 강인한 고조파제거 특성 때문에 가장 많이 쓰이고 있으나 이론적으로 파형의 주기성을 전제로 하기 때문에 주기내에서 성분의 크기가 변하거나, 형태가 달라지면 불가피하게 오차가 발생하게 된다[3,4]. 따라서 디지털 보호계전기의 동작시간을 최소화하기 위해 작은 데이터 윈도우를 사용하며 직류오프셋성분을 완벽하게 제거하는 필터의 설계는 계전기

성능 향상을 위해 필수적인 요소가 된다.

직류오프셋 제거필터에 관한 연구는 주로 지수함수적 비선형 감쇠를 선형화시키는 방법들이 개발되었다[5]. 일차함수 형태나 상수로 근사화시키는 필터들은 불가피하게 위상지연(phase delay)이 나타나고 기본파와 고조파성분에 부분적으로 감쇠를 일으키게 된다. 이를 보완하기 위해 직류오프셋을 지수함수 그대로 보고 처리할 수 있는 필터가 제안되었다[6]. 그런데 이 방법은 임의의 오프셋 시정수를 사전에 설정해 주어야 하고 1주기 데이터 윈도우로 후반부 반주기만 필터링할 수밖에 없는 단점이 있다. 최근 푸리에변환(Fourier transform) 결과를 활용하여 직류오프셋성분을 추정하고, 추정된 직류오프셋성분을 이산푸리에 변환(DFT) 필터의 출력보상에 사용하는 방법이 제안되었다[7]. 그런데 이 방법은 직류오프셋의 시정수에 관계없이 기본파 페이저를 정확히 계산할 수 있으나, 1주기 데이터 외에 직류오프셋성분을 계산하기 위한 2개의 샘플이 추가적으로 필요하였다. 높은 고조파성분에 대한 DFT 결과를 이용한 직류오프셋 추정필터와 노치필터(notch filter)를 이용한 직류오프셋 제거필터가 제안되었다[8,9]. 이 방식들은 직류오프셋성분을 정확히 제거할 수 있으나, 고조파 잡음의 영향을 많이 받는다. 또한 1주기 데이터를 짝수·홀수 샘플로 나누어 각각 적분을 수행하고 이를 이용하여 직류오프셋성분을 추정하는 방법이 제안되었다[10]. 그러나 이 방식도 고조파 잡음에 강점을 보일 뿐 고장신호에 2개 이상의 직류오프셋성분이 포함될 경우 상당한 오차를 가지는 단점이 있었다.

한편 시스템 모델링과 시뮬레이션 데이터 확보를 위하여 ATP, PSCAD/EMTDC, EMTPOWERWORKS 등의 전자과도해석 프로그램(EMTP)이 사용되고 있다. 최근 ATPdraw는 MMI

* 교신저자, 중신회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박
E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr
접수일자 : 2012년 11월 26일
최종완료 : 2013년 1월 13일

가 개선된 EMTP 프로그램으로 초심자도 간단하게 다룰 수 있게 되었다[11,12].

이에 본 논문에서는 직류옴셋의 시정수를 사전에 설정해 줄 필요가 없고 1주기 데이터만으로도 직류옴셋성분을 정확히 추정, 제거할 수 있는 고차로 구성이 가능한 직류옴셋 제거필터를 제안하였다. 제시된 기법의 성능 평가를 위하여 ATPDraw5.7p4를 이용하여 동기발전기 모델링을 수행한 후, 수집된 전류신호를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 기존에 발표된 직류옴셋 제거필터와 성능을 비교, 검토하였다.

2. 직류옴셋 제거필터

고장발생 후 과도상태의 고장전류신호는 기본파 이외에 직렬 리액턴스에 저장된 에너지의 순간적인 방출에 기인하는 지수 함수적으로 감쇠하는 직류옴셋과 병렬 커패시터에서의 에너지방출로 인한 고조파들에 의해 왜곡된다[13,14]. 이에 따라 직류옴셋 성분에 영향을 받지 않는 강인한 특성을 지닌 직류옴셋 제거필터가 필요하다.

2.1 데이터 윈도우가 2샘플인 필터

직류옴셋성분을 지수함수 그대로 반영하면 고장전류신호는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$i_k = \sum_{n=1}^{\infty} i_n \sin(2\pi nk/N) + G \exp(-k\Delta t/\tau) \quad (1)$$

여기서, τ : 시정수.

정리하면 식(2)와 같이 직류옴셋성분은 제거될 수 있다 [15].

$$I_k = i_k - i_{k-1} / \exp(\Delta t/\tau) \quad (2)$$

이 필터의 특징은 기본파에서 위상지연이 제일 크고 기본파의 이득은 1보다 작으며, 주파수가 커질수록 이득도 커진다.

2.2 고차로 구성이 가능한 직류옴셋 제거필터

지수함수적으로 감쇠하는 직류옴셋성분과 고조파성분을 포함하는 고장전류신호는 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

여기에서부터 제시된 필터의 수식 유도를 시작한다. 고조파항을 무한대항까지 고려하면 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$i(t) = B \exp(-bt) + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t) \quad (3)$$

식(3)을 이산형태로 다시 표현하면 식(4)와 같이 된다.

$$i(k) = B \exp(-bk) + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin\left(\frac{2\pi}{N} k \cdot n\right) \quad (4)$$

여기서, $\exp(-b) = D$ 라고 하면, 식(4)는 식(5)와 같이 된다.

$$i(k) = BD^k + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin\left(\frac{2\pi}{N} k \cdot n\right) \quad (5)$$

여기서, B : 직류옴셋의 초기치, n : 고조파 차수, k : 샘플 번호, D : 직류옴셋의 감쇠율, N : 주기 당 샘플 수.

식(5)와 같은 방정식을 고차로 전개해 진행하게 되면 고조파성분은 점차적으로 소거되고 직류옴셋성분만 남게 된다. 이때 직류옴셋의 초기치와 감쇠율을 구하여 옴셋성분을 결정할 수 있다. 그 후 고장신호에서 앞서 구한 옴셋성분을 빼주어 필터링을 수행할 수 있게 된다. 이에 고차로 구성이 가능한 직류옴셋 제거필터라고 명명하였다.

또한 고차로 전개하는 과정에서 일정한 규칙성을 발견할 수 있는데 그 규칙성을 공식화하면 식(6)과 같다.

$$\sum_{n=0}^{2^r-1} i\left[k + \frac{n}{2^r} M\right] = BD^k \sum_{n=0}^{2^r-1} D^{2^{r-n}} + 2^r \sum_{h=0}^{\infty} I_{2^r h} \sin\left(\frac{2\pi}{N} (2^r h) k\right) \quad (6)$$

이때 직류옴셋의 감쇠율과 초기치는 각각 식(7), 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$D^s = \frac{\sum_{n=0}^{2^r-1} i\left[\frac{n}{2^r} N + s\right]}{\sum_{n=0}^{2^r-1} i\left[\frac{n}{2^r} M\right]} \Rightarrow D = \sqrt[s]{D^s} \quad (7)$$

$$B = \frac{\sum_{n=0}^{2^r-1} i\left[\frac{n}{2^r} M\right]}{\sum_{n=0}^{2^r-1} D^{2^{r-n}}} \quad (8)$$

여기서, r : 필터 차수, s : 이격거리.

3. 사례연구

3.1 ATPDraw 모델링

제시한 고차 구성의 직류옴셋 제거필터의 성능을 종래에 가장 많이 사용하고 있는 데이터 윈도우가 2샘플인 필터와

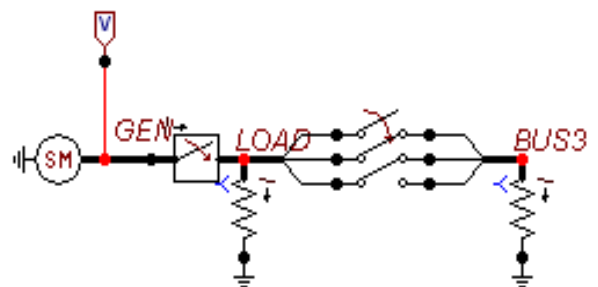


그림 1 ATPDraw5.7p4에 의한 간략한 모델계통
Fig. 1 Simple model system of ATPDraw5.7p4

의 비교하기 위해 ATPDraw5.7p4를 이용하여 간단한 모델 계통을 구성하였다. 고장조건은 발전기 단자의 사고로 한정하였으며 권선의 1선지락사고를 발생시켜서 전류신호를 수집하였다. 발전기의 정격전압은 13.8[kV]이며, 정격용량은 200[MVA]로 설정하였다. 샘플링 주파수는 960[Hz]이다 [12,15].

발전기의 내부정수와 모의조건은 각각 표 1과 표 2에 정리하였다.

표 1 발전기 내부정수

Table 1 Generator internal parameters

파라미터	정수	파라미터	정수
누설 리액턴스 [pu]	0.15	Q축 과도 리액턴스[pu]	1.64
영상분 리액턴스[pu]	0.14	Q축 차과도 리액턴스[pu]	0.18515
전기자저항[pu]	0.00109	D축 개방 과도 시정수[s]	6.19487
D축 리액턴스[pu]	1.7	D축 개방 차과도 시정수[s]	0.02871
D축 과도 리액턴스[pu]	0.23832	Q축 개방 과도 시정수[s]	0.0
D축 차과도 리액턴스[pu]	0.18469	Q축 개방 차과도 시정수[s]	0.07496
Q축 리액턴스[pu]	1.64	관성상수 [Mlbm-ft ²]	0.1881128

표 2 모의조건

Table 2 Simulation condition

고장종류	고장저항[Ω]	전압사고각[°] (고장발생시각[ms])
A상 1선 지락사고	0.0952	0° (66.68)
		45° (68.77)
		90° (70.85)

그림 2는 직류오프셋 제거필터링의 흐름도이다. 이동창과정(moving widow process)으로 수집된 입력 데이터로부터 샘플링 수(N)와 필터차수(r)를 선정하고 이격거리(s)를 구한다. 다음에는 직류오프셋의 초기치(B)와 감쇠율(D)을 연산하고 직류오프셋성분을 결정한 후 고장신호에서 직류오프셋성분을 제거함으로써 필터링을 마치게 된다.

3.2 결과분석

편의상 데이터 윈도우의 2샘플을 이용한 직류오프셋 제거필터기법을 Two sampled window method(method_1), 본 논문에서 제시된 고차로 구성이 가능한 직류오프셋 제거필터 Proposed method로 정의하였다.

3.2.1 전압사고각 0°인 경우

그림 3은 전압사고각 0°인 경우 직류오프셋 제거필터링 결과이다. 그림 3의 보상전·후 필터링 결과, Two sampled

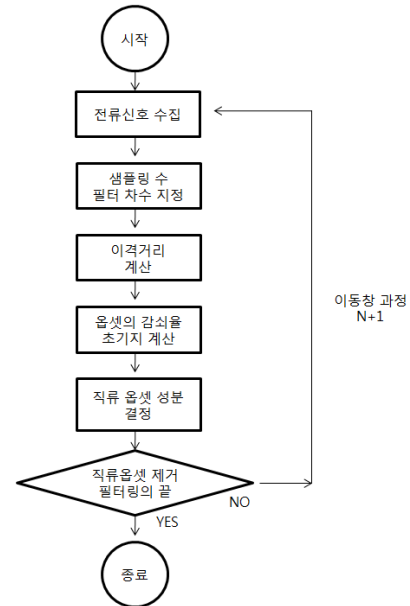


그림 2 직류오프셋 제거필터링의 흐름도

Fig. 2 Flowchart of DC offset removal filtering

window method의 경우 크기는 약 3배 정도의 이득변동이 있으며 위상은 3샘플 지연으로 인해 3.125[ms]의 시지연이 발생되었다. 반면에 Proposed method의 경우 이득오차와 위상차가 발생하지 않았으므로 좋은 필터 성능을 나타내었다.

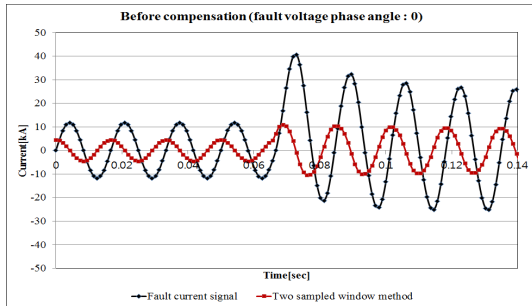
3.2.2 전압사고각 45°인 경우

그림 4는 전압사고각 45°인 경우 직류오프셋 제거필터링 결과이다. 고장 발생시점에서 전류신호에 큰 왜곡을 보이고 있다. 그림 4의 보상전·후 필터링 결과, Two sampled window method의 경우 크기는 약 3배 정도의 이득변동으로 3배정도의 감소를 나타내고 있으며 위상은 3샘플 지연으로 인해 3.125[ms]의 시지연이 발생되었다. Proposed method의 경우 이득오차와 위상차가 발생하지 않았으므로 좋은 필터 성능을 나타내었다.

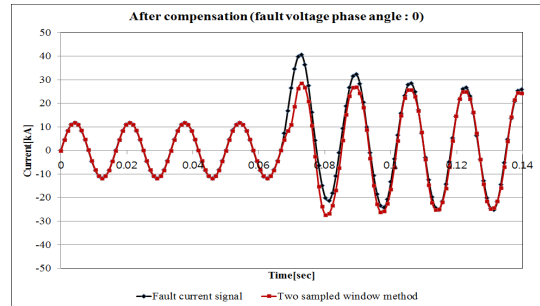
3.2.3 전압사고각 90°

그림 5는 전압사고각 90°인 경우 직류오프셋 제거필터링 결과이다. 대체적으로 전압사고각이 증가함에 따라 고장 발생시점에서 전류신호에 왜곡이 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 5의 보상전·후 필터링 결과, Two sampled window method의 경우 크기는 약 3배 정도의 이득변동으로 3배정도의 감소를 나타내고 있으며 위상은 3샘플 지연으로 인해 3.125[ms]의 시지연이 발생되었다. Proposed method의 경우 이득오차와 위상차가 발생하지 않았기 때문에 보상을 해줄 필요가 없으므로 우수하고 간편한 성능을 나타내었다.

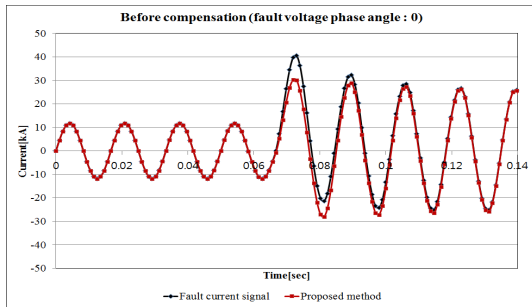
전압사고각을 다양하게 변화시켜가면서 시뮬레이션을 하였는데 결과적으로 종래의 기법에서는 이득이 3배 감소하였고 시지연이 3.125[ms]가 발생하였으나, 제시된 고차 구성의 직류오프셋 제거필터는 이득변동과 시지연이 거의 나타나지 않음을 알 수 있었다.



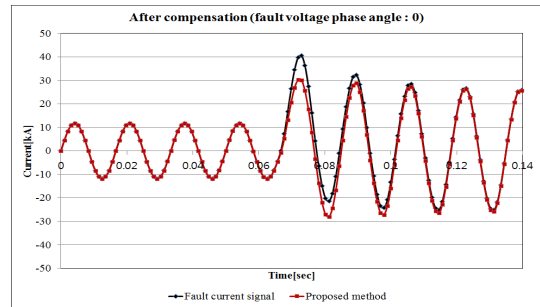
(a) Method_1 (보상전)



(b) Method_1 (보상후)



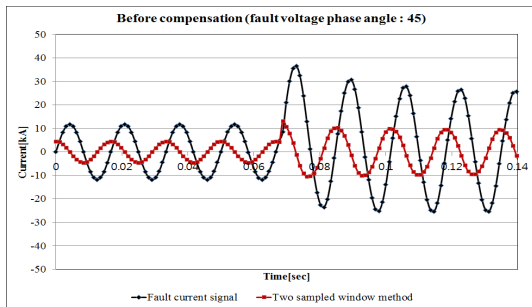
(c) Proposed method (보상전)



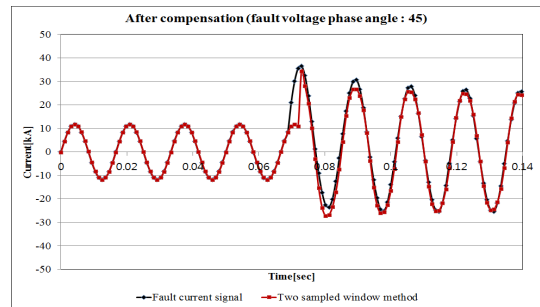
(d) Proposed method (보상후)

그림 3 직류 옵셋 필터링 결과 (전압사각각 0°)

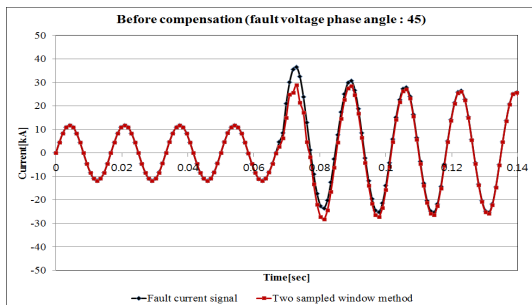
Fig. 3 Results of DC offset removal filtering (Fault voltage phase angle 0°)



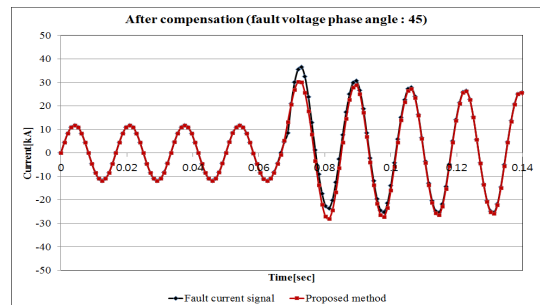
(a) Method_1 (보상전)



(b) Method_1 (보상후)



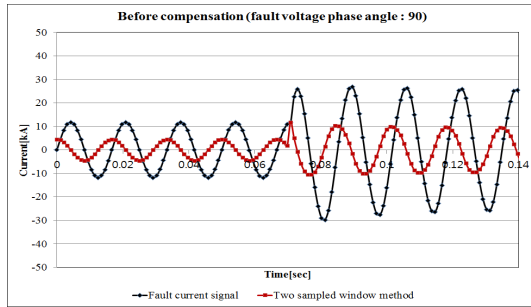
(c) Proposed method (보상전)



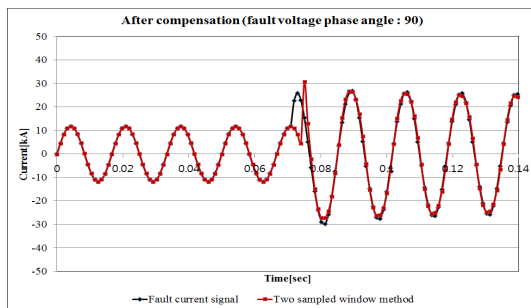
(d) Proposed method (보상후)

그림 4 직류 옵셋 필터링 결과 (전압사각각 45°)

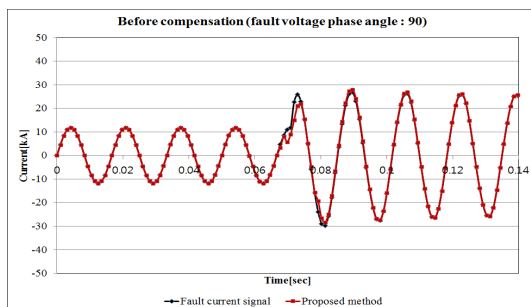
Fig. 4 Results of DC offset removal filtering (Fault voltage phase angle 45°)



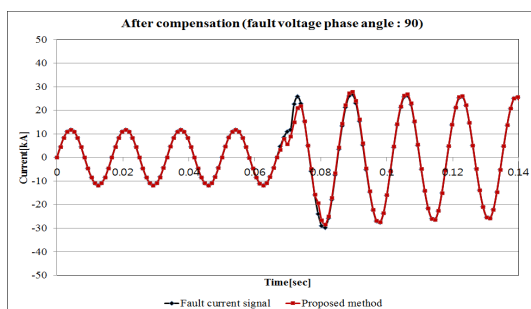
(a) Method_1 (보상전)



(b) Method_1 (보상후)



(c) Proposed method (보상전)



(d) Proposed method (보상후)

그림 5 직류 오프셋 필터링 결과 (전압사고각 90°)

Fig. 5 Results of DC offset removal filtering (Fault voltage phase angle 90°)

4. 결 론

전력시스템에서 고장이 발생하면 지수 함수적으로 감소하는 직류오프셋 성분이 함유된다. 이에 직류오프셋성분에 영향을 받지 않는 강인한 특성의 직류오프셋 제거필터가 필요하다.

본 논문에서는 시정수를 사전에 설정해 줄 필요가 없고 1 주기 데이터만으로도 직류오프셋성분을 정확히 제거할 수 있는 개선된 직류오프셋 제거필터를 제시하였고 기존에 가장 많이 사용되는 데이터 윈도우의 2샘플을 이용한 직류오프셋 제거필터와 비교 연구를 수행하였다. 제시된 고차로 구성이 가능한 직류오프셋 제거필터의 성능 평가를 위해 전자과도해석프로그램인 ATPDraw5.7p4를 이용한 동기발전기 모델링을 통해 수집된 전류신호를 활용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

시뮬레이션 결과, 제시된 직류오프셋 제거필터는 기존의 필터들과 비교하였을 때 어떠한 사전 정보가 필요하지 않았으며 특히 위상지연과 이득오차도 없는 우수한 성능을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (2010T100100145)

참 고 문 헌

- [1] A.T. Johns, M.A. Martin, "Fundamental Digital Approach to the Distance Protection of E.H.V. Transmission Lines", Proceedings of IEE, Vol. 125, No. 5, pp. 135~140, 1978. 5.
- [2] D.B. Fakuddin, K. Parthasarathy, L. Jenkins, K.S. Ramanjaneyulu, "Microprocessor Based Algorithm for Symmetrical Components Calculation", Proceeding of IEEE, Vol. 71, No. 12, pp. 1463~1464, 1983. 12.
- [3] 조경래, 정병채, 박종근, "송전선 보호용 적분근사 거리계전 알고리즘", 대한전기학회 논문지, Vol. 43, No. 5, pp. 711~720, 1994. 5.
- [4] 박철원, 박규현, 이기원, 김철환, 신명철, "산술퓨리에 변환 필터에 의한 디지털 거리계전 알고리즘에 관한 연구", 1995년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 471~475, 1995. 7.
- [5] 강상희, 박종근, "Offset이 제거된 반주기 데이터를 사용하는 고속 Haar 변환에 기초한 디지털 거리계전 알고리즘", 대한전기학회 논문지, Vol. 41, No. 9, pp. 973~983, 1992. 9.
- [6] 강상희, 김남호, 강용철, 김일동, 박종근, "계통사고시 지수함수 형태로 감소하는 DC-Offset 성분을 계전신호에서 제거하는 Digital Filter 디자인", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 59~62, 1992. 7.
- [7] J.C. Gu, S.L. Yu, "Removal of DC offset in current and voltage signals using a novel Fourier filter

algorithm,” IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, pp. 73~79, 2000. 1.

- [8] T.S. Sidhu, X. Zhang, F. Albasri, M. S. Sachdev, “Discrete Fourier transform based technique for removal of decaying DC offset from phasor estimates,” Proceeding of IEEE, Vol. 150, No. 6, pp. 745~752, 2003. 11.
- [9] S.R. Nam, J.M. Sohn, S.H. Kang, and J.K. Park “Modified Notch Filter based Instantaneous Phasor Estimation for High-Speed Distance Protection,” Proceeding of IEEE, Vol. 89, No. 4, pp. 311~317, 2007. 3.
- [10] J.C. G, S.L. Y, “Removal of DC offset in current and voltage signals using a novel Fourier filter algorithm”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, pp. 73~79, 2000. 1.
- [11] KEUG, “EMTP 중급자 강좌“, pp. 1~100, 2011. 7..
- [12] 박철원, 반우현, “ATPDraw5.7p4 모델링 데이터를 이용한 전압억제 과전류계전기 동작특성에 관한 연구”, 대한전기학회 논문지 Vol. 61P, No. 1, pp. 23~28, 2012. 3.
- [13] 오예준, 장준, 박진규, 김수환, 강상희, “DC 제거용 FIR필터가 거리계전기에 미치는 영향 분석”, 2009년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2196~2197, 2009. 7.
- [14] 이규영, “실시간 디지털 거리계전기의 구현을 위한 직류 옵셋 제거필터에 관한 연구”, 성균관대학교 전기공학과 석사학위 논문, pp. 1~50, 1994. 10.
- [15] 박철원, 김준영, 반우현, “과전류계전기의 직류옵셋 특성”, 2012년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 220 ~221, 2012. 7.

저 자 소 개



박철원 (朴 哲 圓)

1961년 8월 13일생.

1988년 성균관대학교 전기공학과 졸업,
1996년 성균관대학교 대학원 전기공학과
졸업(공학박), 1989년~1993년 금성산전연
구소 주임연구원, 1993년~1996년 프로컴
시스템 기술연구소 선임연구원, 1993년~

1997년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 강사,
1997년~2007년 국립강릉원주대학교 전기공학과 전임강
사, 조교수, 부교수, 2007년~현재 국립강릉원주대학교 전
기공학과 정교수, 2011년~현재 대한전기학회 전력기술부
문화 이사, 2012년~현재 대한전기학회 산업전기위원회
편집위원장

Tel : 033-760-8786

Fax : 033-760-8781

E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr