

발전기의 불평형 검출을 위한 디지털 역상 계전 알고리즘

Digital Negative Sequence Relay Algorithm for Detection of Unbalanced State in a Generator

박 철 원*
(Chul-Won Park)

Abstract - There are conditions that can be unbalanced three phase currents in a large generator by untransposed lines, unbalanced loads, unsymmetrical faults, and open phases. The unbalanced conditions can producing negative sequence components of current that induce two times frequency current in the surface of the rotor, the retaining rings, the slot wedges in the field windings. These rotor currents make the rotor rapidly overheat, so the rotor can cause substantial damage in a very short time. This paper presents the digital negative sequence relay algorithm for unbalanced protection in a generator. The proposed algorithm was tested by using collected current signals on PSCAD/EMTDC considering a hydro turbine based generator control system. It can be seen that the proposed relaying by negative sequence current is useful for detection of unbalanced state of large generator.

Key Words : Detection, Faults, Generator control system, Large generator, Negative sequence current, PSCAD/EMTDC, Rotor, Unbalanced state

1. 서 론

계통에 불평형이 발생하거나 고장이 발생하면 불평형전류가 상대적으로 증가하게 된다. 이에 역상계전기는 전력시스템의 불평형 또는 고장상태를 검출하는데 사용된다[1].

대형발전기에서의 불평형 3상전류는 송전선로의 연가부족에 의한 선로정수 불평형, 불평형부하, 불평형고장 및 상의 개방 등에 의해서 발생할 수 있다. 이 불평형은 회전자의 표면에 두 배 주파수의 전류를 유도하는 전류의 역상분을 발생시킨다. 또 이 역상전류(negative sequence current : NSC)는 슬롯웨지(slot wedge)나 여자권선에 정격주파수의 두 배 주파수가 되는 전류를 흐르게 함으로써 회전자를 급격하게 과열시켜서 회전자에 커다란 손상을 일으킬 수 있다. 즉, 역상전류는 회전자의 반대방향에서 동기속도로 회전하는, 반대 자속을 생산하게 되고, 회전자 부분에 유도되는 맴돌이전류는 회전자의 높은 온도상승의 결과와 회전부품에 기계적스트레스의 원인이 된다. 그러므로 대형발전기에서 불평형에 대한 보호가 필요하다[2~5].

해외 연구로 참고문헌[6]에서는, 발전기 회전자에서 역상전류의 효과를 분석하였고, 역상전류 판정을 위한 새로운 기법이 제시되었다. Standard IEC 60034-1에 따르면, 터빈발전기는 불균형부하를 위해 설계되어야 하는데, 정격전류의 10%까지 역상전류를 허용하는 기능이 있어야한다. 대부분의 제조업체는 경험적으로 발전기의 역상기능을 보장하고 있

다. 참고문헌[7]에 의하면, 불평형전류는 특히 유도전동기의 동작에 영향을 미친다. 전동기에 공급하는 전압에서 상대적으로 작은 불평형은 영상분 부하전류를 상승하게 할 수 있기 때문에, 역상분은 전동기 출력토크를 감소하고 전동기에 급격한 가열을 초래하게 된다. 참고문헌[8]에서는 배전시스템의 역상전류 동작을 분석하였다. 이 논문에서는 단락고장의 경우 과전류계전기보다 더 빠르고 민감하게 설정할 수 있다는 것을 보여주었다.

국내 연구로는 불평형 보상용 STACOM의 역상분전류 검출을 위한 디지털 버터워스 필터가 발표되었고[9], 풍력발전기 보호기법에 역상전류의 적용이 시도되었다[10]. 발전소의 사고방지를 위한 발전기 보호계전기법의 일환으로 역상전류기법이 검토되었다[11].

본 논문에서는 대용량발전기의 불평형 검출을 위한 디지털 역상계전알고리즘을 제시한다[2,12]. 제시된 디지털 역상계전기법은 PSCAD/EMTDC에 의한 수력발전기 모델계통으로부터 수집한 전류데이터를 활용하여 검증하고자 한다[13].

2. 발전기의 역상분 전류에 의한 불평형 보호

발전기에 불평형 3상전류를 유발하는 몇몇의 계통상태는 송전선의 연가부족에 의한 선로정수 불평형, 불평형부하, 불평형고장 및 상의 개방이다. 그러나 역상전류를 발생하는 가장 큰 원인은 발전기 상간 단락사고이다. ΔY 로 연결된 승압기가 있는 발전기에서 승압기의 Y쪽의 단상 지락사고는 발전기로부터 상간 단락사고로 보여진다. 발전기의 단상 지락사고는 상간 단락사고만큼의 역상전류를 생성하지 않는다. 개방도체상태(open conductor conditions)는 상간단락 또는 단상지락사고에 비해 작은 역상전류를 생성한다. 만약 작은 부하전류에서도 발전기에 심각한 위협을 가하는 개발도

* 교신저자, 종신회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박
E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr

접수일자 : 2013년 11월 11일

수정일자 : 2013년 11월 24일

최종완료 : 2013년 11월 26일

체상태를 감지하지 못한다면 역상전류는 회전자를 과도하게 가열할 것이다.

역상계전방식은 불평형 고정자전류가 회전자를 과도하게 가열하는 것으로부터 보호하기 위해 사용된다. 불평형 계통상태의 대칭적인 요소로부터 발전기 고정자내의 전류는 정상분, 역상분, 영상분으로 분해할 수 있다. 불평형전류의 역상분은 멈춤링, 슬롯웨지, 계자권선을 통해 흘러 회전자에 2 배 주파수의 표면전류를 유도하게 되고, 회전자전류는 매우 짧은 시간에 위험한 높은 온도를 야기할 수 있게 된다.

2.1 역상전류에 의한 발전기 손상[2,3,12]

동기발전기에서 역상가열은 불평형운전으로 특정한 한계를 일으킨다. 적은 고정자손실을 제외하면 역상전류 때문에 회전자에서 손실이 발생한다.

에너지가 회전자에 투입되고 회전자 온도상승의 시간간격은 거의 I_2^2t 에 비례한다. 여기서 I_2 는 고정자로부터의 역상전류이고 t 는 초 단위로 시간간격이다. 그 한계는 식(1)의 방정식으로 표시할 수 있다.

$$K = I_2^2t \tag{1}$$

여기서, K : 발전기 설계와 사이즈에 따른 상수,
 t : 시간[sec],
 I_2 : 역상분 전류의 실효치이다.

제한하는 상수 K 는 역상전류가 고정자에 permissible I_2^2t 10이 공급되는 동안 역상전류의 경로를 따라 발전기의 고정자에 배치된 온도 센서에 의해 결정된다. 이 방식은 회전자가 견딜 수 있는 역상전류의 한계를 결정하기 위해 사용되었다. K 의 값은 ANSI C50.13에 따른 각 특정한 단위로 발전기 제조사에 의해 제공되게 된다.

이러한 역상전류(I_2)를 견디어야 하는 발전기의 요구사항이 IEEE Std. C50.12 & 13 및 IEC60034-1에 I_2 의 함수로 명시되어 있으며, 그림 1는 식(1)과 같이 표시되는 발전기의 불평형전류의 지속시간 허용곡선을 나타낸다.

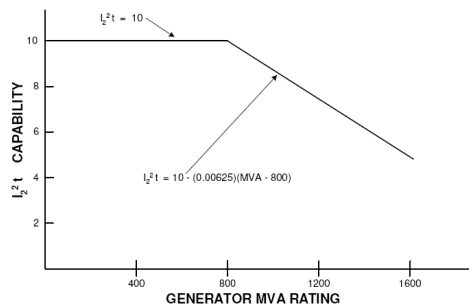


그림 1 발전기의 불평형전류의 지속시간 허용곡선
 Fig. 1 Continuous and short time unbalanced current capability of generators

발전기가 정격용량을 초과하지 않고 또한 각상의 전류가

정격의 105%를 초과하지 않는 상태로 운전되면, 표 1의 값으로 주어지는 불평형전류 I_2 가 연속적으로 흐르더라도 손상이 발생하지 않아야 한다. 여기서 I_2 는 정격전류의 %값을 나타낸다. 표 2는 발전기별 허용가능 K 값이다.

표 1 허용가능 역상전류

Table 1 Permissible negative sequence current

극의종류	구조 및 냉각특성 구분	허용가능 I_2	
요철 극	제동권선 有	10	
	제동권선 無	5	
원통 극	간접 냉각방식		
	직접 냉각방식	~350 MVA	8
		351~1250 MVA	$8 - ([MVA] - 350) / 300$
		1251~1600 MVA	5

표 2 발전기별 허용가능 K 값

Table 2 Permissible K value of type of generator

발전기의 구조 구분		허용가능 $I_2 \times t$	
요철 극형		40	
동기조상기		30	
원통 극형	직접 냉각방식		
	간접 냉각방식	0~800MVA	10
		801~1600MVA	그림 1의 곡선 참고

2.2 역상전류성분

3상전류로부터 대칭좌표법에 의하여 식(2)와 같은 대칭성분이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_0 &= \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \\
 I_1 &= \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \\
 I_2 &= \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c)
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = -0.5 + j0.866025404$,

$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = -0.5 - j0.866025404$ 이다.

정상분을 정리하여 실수부와 허수로 표현하면 식(3)과 같고, 역상분을 정리하여 실수부와 허수로 표현하면 식(4)와 같다.

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a - \frac{1}{2}(I_b + I_c) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(I_b - I_c)) \tag{3}$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a - \frac{1}{2}(I_b + I_c) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(I_c - I_b)) \tag{4}$$

여기서, I_a, I_b, I_c 는 a상, b상 및 c상의 선 전류입니다.

2.3 불평형 전류보호 알고리즘

이 방식은 발전기에 손상을 끼칠 수 있는 외부 불평형상

태로부터 발전기를 보호한다. 그림 2와 같이 I_2 를 검출하여 동작하는 반한시 과전류계전기가 사용된다. 2가지의 방식이 주로 적용되는데 하나는 초강반한시 특성을 갖는 전기기계식 과전류계전기이며, 다른 하나는 발전기의 I_2 허용곡선과 일치되는 특성을 가진 정지형 또는 디지털형 과전류계전기이다[2,3,12].

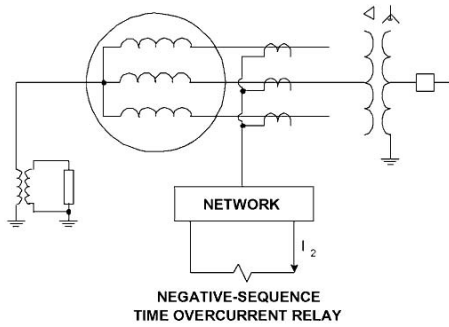


그림 2 불평형 전류보호
Fig. 2 Unbalanced current protection

그림 3은 정지형 또는 디지털형 전형적인 역상분 특성곡선을 나타낸다. 디지털 전류 불평형 차단함수는 그림 3에서 $K=I_2^2t$ 로 표현되는 운전시간 특성곡선이다. 선형복귀 특성은 일시적인 불평형전류 차단을 수반하는 냉각방식에 근접할 수 있도록 한다. 디지털 발전기보호는 조정가능한 동작치와 시간지연을 갖는 역상분전류에 의해 운전되는 전류불평형 경보기능을 포함해야 한다.

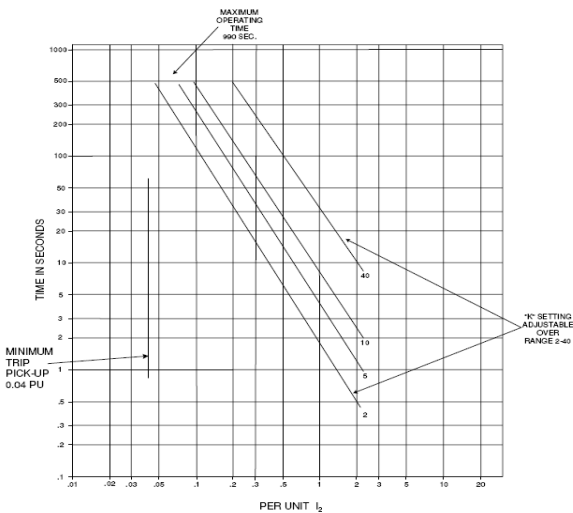


그림 3 정지형 또는 디지털형 역상분계전기의 전형적인 과전류 특성곡선
Fig. 3 Typical time-overcurrent curves for static or digital negative sequence relay

전류 불평형 트립(46T)은 식(5)와 같이 동작시간이 표현된다.

$$T = \frac{K_2}{(I_2/I_{FL})^2} \text{ seconds} \quad (5)$$

여기서, I_2 : 역상전류, K_2 : 46T 설정, I_{FL} : 발전기 전부하 전류 이다.

전류 불평형 알람(46A)은 PICKUP은 허용 I_2 의 70%이고, Time Delay는 TL14이다. 전류 불평형 알람은 식(6)과 같이 표현된다.

$$I_2 > \text{PICKUP} \quad (6)$$

I_2 는 역상전류 같으며 $I_2 > \text{PICKUP}$ 일 때 pick up하며 TL14 초 뒤에 트립한다. 본 논문에서는 전류 불평형 트립(46T)에 관하여 연구하였다.

3. 역상전류 사고모델링

선정한 모델 발전기는 120[MVA] 용량의 수력발전기로서 정격유효전력은 108[MW], 선간전압은 24[kV]이다[3]. Duration of run 시간은 30[sec]이고, Solution time step은 104.167[us] 이다. 발전기제어시스템은 터빈 모델을 통하여 기계적인 토크 입력을 받으며 여자전압 조절을 위한 여자기와 조속기를 사용하여 발전기를 제어하게 된다[3,13].

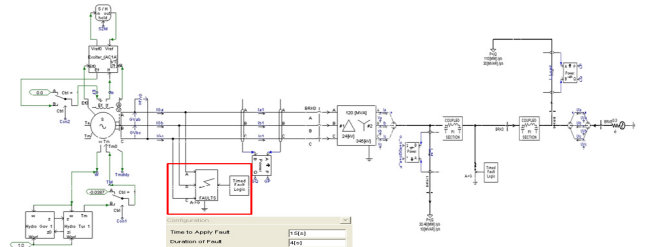


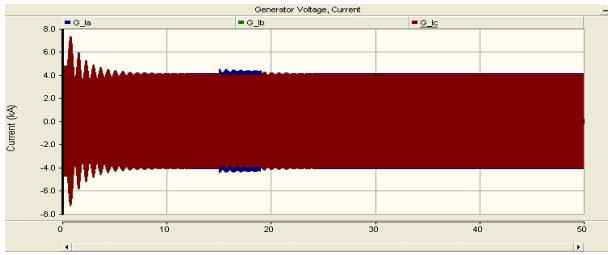
그림 4 PSCAD/EMTDC에 의한 발전기 불평형 사고모델링
Fig. 4 Fault modeling of unbalanced state in a generator using PSCAD/EMTDC

3.1 A상 지락 사고모델링

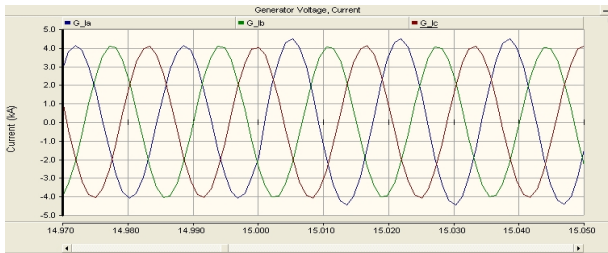
발전기 단자에서 A상 지락고장이 15[sec]에서 발생하여 4[sec] 동안 지속되었다고 가정하였다. 그림 4는 PSCAD/EMTDC에 의한 역상 불평형 사고모델링을 나타낸다. 그림 5는 이때의 3상 전류 순시치를 나타낸다. (b)는 상세전류를 나타낸다. 그림 5로부터 15[sec] 부근에서 4[sec] 동안 A상 전류가 상승하는 것을 알 수 있다.

3.2 AB상 단락 사고모델링

발전기 단자에서 AB상 단락 고장이 15[sec]에서 발생하여 1[sec] 동안 지속되었다고 가정하였다. 그림 6은 이때의 3상 전류 순시치를 나타낸다. (b)는 상세전류를 나타낸다. 그림 6과 같이 고장발생직후 A상과 B상 전류신호가 급증하는 것을 알 수 있다.

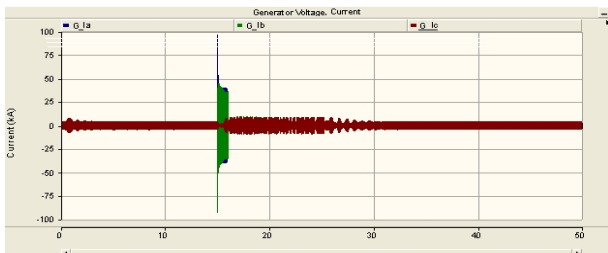


(a) 전류

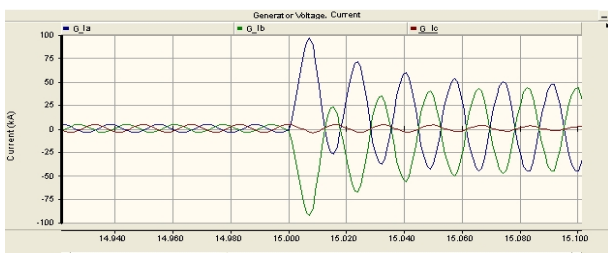


(b) 상세 전류

그림 5 A상 지락사고시의 3상 순시치 전류
Fig. 5 Three phase current during A phase to ground fault



(a) 전류



(b) 상세 전류

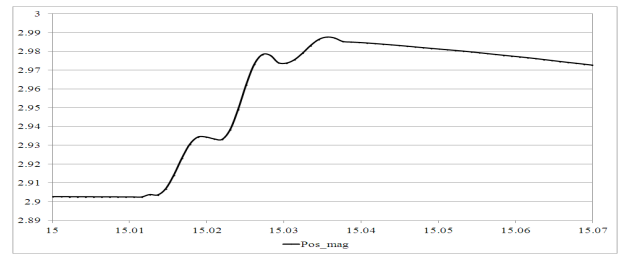
그림 6 AB상 단락사고시의 3상 순시치 전류
Fig. 6 Three phase current during AB phase to short fault

4. 오프라인 시뮬레이션

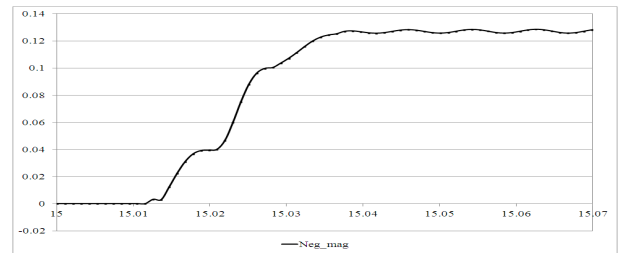
4.1 A상 지락 사고 시뮬레이션

A상 직접지락사고가 15[sec]에서 발생한 경우, PSCAD 사고모델링으로부터 수집된 순시치 3상전류로부터 3상의 DFT 크기를 구한다. 그림 7은 3상전류의 DFT 크기로부터, 대칭좌표법에 의하여 계산된 대칭분을 나타낸다. (a)는 정상분 전류, (b)는 역상분 전류, (c)는 영상분 전류이다. 고장이 발생하기 직전까지에서 정상분은 일정하고 역상분과 정상분

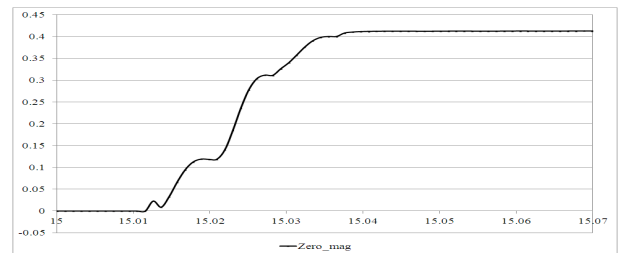
은 존재하지 않는다. 그런데 고장이 발생한 직후, 정상분은 증가하게되며 역상분과 영상분이 흐르기 시작하여 증가하게 되는 것을 알 수 있다.



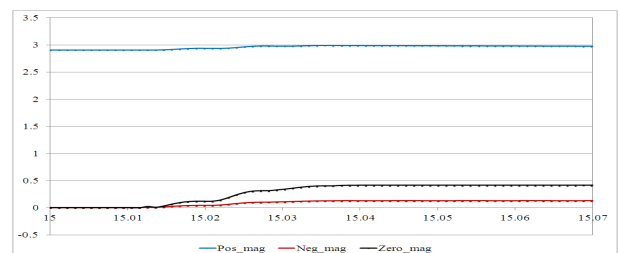
(a) 정상분 전류



(b) 역상분 전류



(c) 영상분 전류



(d) 대칭분 전류

그림 7 A상 지락사고시의 대칭분 전류
Fig. 7 Symmetrical component current during A phase to ground fault

본 논문에서 역상분전류의 Pickup 값은 역상분전류/정격 전류(I_{neg}/I_{rated}) 값으로 하는데, 그 값은 0.03(3%)으로 하였고, Trip 값은 K 값, 40으로 하였다[4]. 그림 8은 제시된 역상계전기의 고장관별인 Pickup 및 Trip을 나타낸다. 그림 8로부터 Pickup은 고장발생직후 33번째인 0.034375[sec]이고, Trip은 고장발생직후 50번째인 0.052083[sec]가 되는 것을

알 수 있다. 고장판별시간은 고장발생직후부터 0.052083[sec]가 되기 때문에 15.052083[sec]에서 Trip 신호가 발생된다.

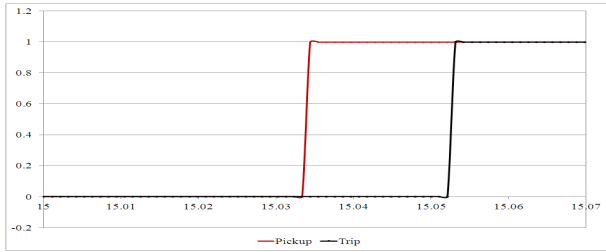


그림 8 A상 지락사고시의 고장판별
Fig. 8 Fault discriminant during A phase to ground fault

4.2 AB상 단락 사고 시뮬레이션

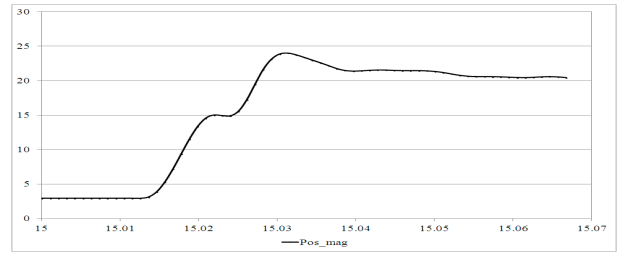
AB상 단락사고가 15[sec]에서 발생한 경우, PSCAD 모델링으로부터 수집된 순시치 3상전류로부터 3상의 DFT 크기를 구한다. 그림 9는 3상전류의 DFT 크기로부터, 대칭좌표법에 의하여 계산된 대칭분을 나타낸다. (a)는 정상분 전류, (b)는 역상분 전류, (c)는 영상분 전류이다. 고장이 발생하기 직전까지에서 정상분은 일정하고 역상분과 정상분은 존재하지 않는다. 그런데 고장이 발생한 직후, 정상분은 증가하게 되며 역상분과 영상분이 흐르기 시작하여 증가하게 되는 것을 알 수 있다. 지락전류에 비교하여 단락전류가 더 크게 흐르는 것을 알 수 있다.

본 논문에서 역상분전류의 Pickup 값은 Ineg/Irated 값으로 하는데, 그 값은 0.03(3%)으로 하였다. Trip 값은 K 값, 40으로 하였다. 그림 10은 제시된 역상계전기의 고장판별인 Pickup 및 Trip을 나타낸다. 그림 10으로부터 Pickup은 고장 발생직후 13번째인 0.01342[sec]이고, Trip은 고장발생직후 41번째인 0.042708[sec]가 되는 것을 알 수 있다. 고장판별시간은 고장발생직후부터 0.042708[sec]이기 때문에 15.042708[sec]에서 Trip 신호가 발생된다.

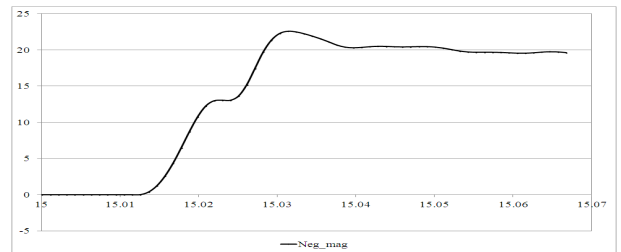
5. 결 론

역상계전기는 불평형 전류가 회전자를 과도하게 가열하는 것으로부터 검출하는 전력시스템 보호에 사용된다. 특히 회전자에서의 과대 발열의 원인이 되는 발전기의 불평형 부하와 전동기에서의 견딜 수 있는 진동의 원인이 되는 전동기의 불평형 전류와 송전선로에서의 불평형 조건과 비대칭 고장을 검출하는데 사용된다.

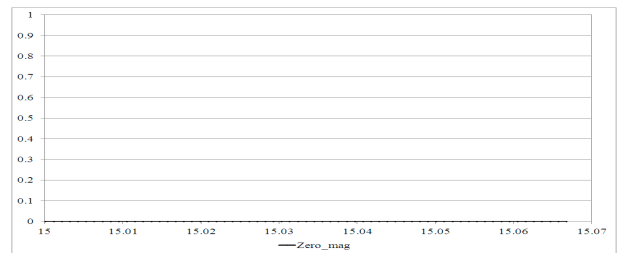
본 논문에서는 대용량 발전기의 불평형 검출을 위한 디지털 역상계전 알고리즘을 제시하였다. 제시된 역상계전기법은 PSCAD/EMTDC에 의한 120[MVA] 수력발전기 제어시스템 모델계통으로부터 수집한 전류 데이터를 활용하여 그 성능을 입증하였다. 수집된 순시치 3상전류로부터 3상의 DFT 필터를 통하여 페이지의 크기와 위상각을 구한 후, 대칭좌표법에 의해 추출된 역상분을 이용하여 역상계전기의 고장판별을 시험하였다. 제시된 역상계전기의 고장판별시간은 A상 지락사고의 경우 0.052083[sec]이었고, AB상 단락사고의 경우 0.042708[sec] 으로서 발전기의 불평형상태를 신속하고 정확하게 검출하였다. 그러므로 제시된 기법은 대용량 발전기의 불평형보호에 사용이 가능할 것으로 생각된다.



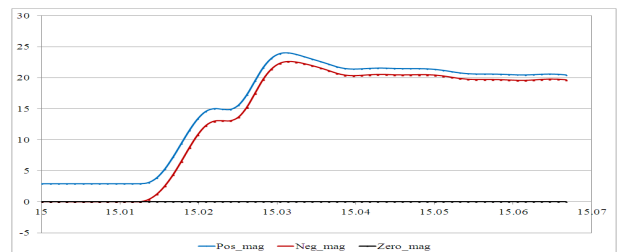
(a) 정상분 전류



(b) 역상분 전류



(c) 영상분 전류



(d) 대칭분 전류

그림 9 AB상 단락사고시의 대칭분 전류
Fig. 9 Symmetrical component current during AB phase to short fault

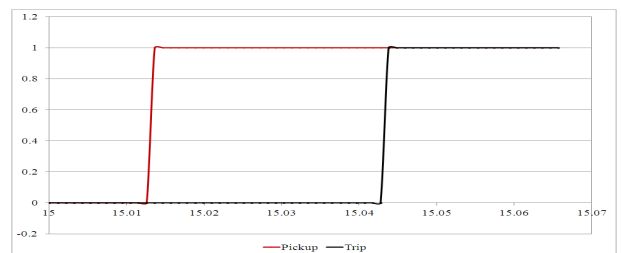


그림 10 AB상 단락사고시의 고장판별
Fig. 10 Fault discriminant during AB phase to short fault

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원(2010T100100415)과 2013년도 인택전기전자로부터 연구비를 지원받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Muhammad Mohsin Aman, Ghauth Bin Jasmon, Qadeer Ahmed Khan, Ab. Halim Bin Abu Bakar, Mohd Noor Abdullah, "Modeling and Simulation of Digital Negative Sequence Relay for Unbalanced Protection of Generator", 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference(PEOCO 2012), Melaka, Malaysia, 6-7 June 2012, pp. 72-77.

[2] IEEE Power System Relaying Committee, "IEEE Standard AC Generator Protection", IEEE Std. C37.102-2006, pp. 1~167.

[3] 박철원 외, "대형 발전기 내부사고 보호를 위한 다기능 IED 시제품 기술 개발", 지식경제 기술혁신사업 3차년도 최종보고서, pp. 1~217, 2013.5.

[4] GE Multilin, "G60 Generator Protection System UR Series Instruction Manual", pp. 1~C4, 2011.

[5] ABB, "Generator protection REG670, Application manual", Vol 1.2, pp. 1~608, 2011.

[6] T. Bach, et al., "Determining negative sequence currents of turbine generator rotors," in Electrical Machines and Systems, ICEMS 2009 International Conference on 2009, pp. 1-6.

[7] ABB Automation Products, "Negative sequence overcurrent relay and protection assemblies", 1999.

[8] A. F. Elneweihi, et al., "Negative-sequence overcurrent element application and coordination in distribution protection", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, pp. 915~924, 1993.

[9] 임수생, 이은웅, 손홍관, 김석근, 김준호, "불평형보상용 STACOM의 역상분 전류 검출을 위한 디지털 버터워쓰 필터", 2000년도 대한전기학회 추계부문학술대회 논문집, pp. 333~335, 2000.11.25.

[10] 강용철, 정태영, 국경수, 강해권, 이병은, 김연희, "역상 전류를 이용한 풍력발전기 보호 방법", 2010년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 560~561, 2010.7.14-16.

[11] 박철원, 오용택, 김윤상, 석광호, 고준호, "발전소의 사고방지를 위한 발전기 보호계전기법에 관한 연구", 2011년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, pp. 311~312, 2013.10.

[12] 박철원 외, "발전기의 불평형 보호를 위한 역상계전기법", 2013년도 대한전기학회 산업전기위원회 추계학술대회 논문집, pp. 39~41, 2013.10.

[13] 박철원, 오용택, "발전기의 사고 시뮬레이션과 분석", 대한전기학회 논문지 Vol. 62P, No. 3, pp. 151~158, 2013.9.

저 자 소 개



박철원 (朴哲圓)

1961년 8월 13일생. 1988년 성균관대학교 전기공학과 졸업, 1996년 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1989년~1993년 금성산전연구소 주임연구원, 1993년~1996년 프로컴시스템 기술연구소 선임연구원, 1993년~1997년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 강사, 1997년~2007년 국립강릉원주대학교 전기공학과 전임강사, 조교수, 부교수, 2007년~현재 국립강릉원주대학교 전기공학과 정교수, 2011년~현재 대한전기학회 전력기술부문회 이사, 2012년~현재 대한전기학회 산업전기위원회 편집위원장
Tel : 033-760-8786
Lab : 033-760-8796
Fax : 033-760-8781
E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr