

A Characteristic Study on the Power Factor Compensation Application of High Voltage Induction Motor

金宗謙[†] · 朴永鎮* · 李殷雄**
(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park · Eun-Woong Lee)

Abstract - Reactor starting method has the advantage of simplicity and closed transition in spite of lower starting torque per kVA. This method allows a smooth start with almost no observable disturbance on transition and is suitable for applications such as centrifugal pumps or fans.

Reactive power doesn't contribute to work but needs to sustain the electromagnetic field required for the induction motor to operate. Starting power factor of induction motor is specially lower than running power factor. Power factor application is needed to compensate for the lower power factor of induction motor. This power factor compensation systems is occasionally being hit by the effects of the starting reactor connection position at the starting, stopping of high-voltage induction motor. This paper describes voltage and current stress affected by the installation position of power factor compensation application at the reactor starting method.

Key Words : Induction Motor, Capacitor, Reactor, Power Factor, Pump

1. 서 론

고압 유도전동기는 산업현장에서 상당히 많은 에너지를 사용하는 부하설비이다. 이 전동력 부하설비의 사용증가에 따라 필요한 전력량을 높이는 것도 중요하지만, 생산된 에너지의 효율을 높여 운전하는 것이 더 중요하다.

유도전동기에 필요한 무효전력을 역률 보상장치를 사용하여 전원측을 대신하여 공급할 경우 피상전력을 줄일 수 있어 역률을 증가시킬 수 있다. 역률 보상장치는 부하마다 설치하는 경우와 전체를 일괄 보상하는 방법 그리고 부하의 운전용량에 따라 자동적으로 보상하는 방법 등이 있다. 고압 대용량의 부하로서 일정한 운전패턴을 가지고 있는 경우에는 개별보상이 주로 이용된다[1-3].

유도전동기를 기동하는데 방식에는 직입기동, Y- Δ 기동, 리액터 기동 등이 있지만, 대용량의 펌프 설비를 운전하는 곳에서는 주로 리액터 기동방식이 적용되고 있다. 리액터 기동방식은 기동시 높은 전류를 줄이기 위해 기동시는 리액터를 이용하지만 정격 속도부근에 도달한 다음에는 전전압으로 운전하는 것이다.

리액터 기동방식에서 역률 보상설비의 경우 대부분 리액터의 전단에 설치 운전하는 것을 권장하고 있지만, 리액터 후단에 설치하는 경우도 있다. 리액터 기동방식에 의해 전

동기의 기동, 운전 및 정지시 발생하는 전압 및 전류 스트레스로 역률 보상설비용으로 설치된 리액터 및 커패시터가 종종 소손되는 경우가 있다[4-6].

본 연구에서는 부하량 조절을 위해 기동 정지를 자주 반복하는 6.6kV 전동력 부하설비에서 기동용 리액터설비의 전후단에 역률 보상을 위해 설치하여 기동, 운전, 정지시에 발생하는 전압 및 전류 스트레스를 분석하였다.

2. 시스템 구성

상하수도 설비인 취수장, 가압장, 정수장, 하수처리장 등에서 펌프용 구동설비는 대부분 고압 유도전동기로 항상 많은 물량을 공급 조절해야 하므로 전동기 대수 및 용량에 따라 22.9kV로 수전하는 경우도 있지만, 부하 용량이 아주 큰 경우 154kV로 2회선으로 전원을 안정되게 공급받고 있다.

그림 1은 본 연구에 사용된 펌프 구동설비에 대한 단선결선도로서 고압 유도전동기는 병렬로 연결된다. 본 연구에서의 고압 전동기는 6.6kV로 델타 방식이고 1차측 변압기는 Y결선으로 구성된다. 그림 1에서 역률 보상 장치는 일반적으로 리액터의 전단에 설치하고 있지만, 현장에 따라 2차측에도 설치하는 경우가 있다. 역률 보상 설비의 연결에서 개폐기를 사용하는 분리형과 개폐기를 사용하지 않고 부하측 가까운 단자에 바로 연결하는 직결형이 있다. 커패시터의 용량이 100[kVA]이하에서는 주로 직결형이 많이 이용되고, 250[kVA]를 넘는 경우에는 분리형이 이용되고 있다[4]. 본 연구에서의 역률 보상 커패시터는 용량이 크지만 직결형으로서 기동부터 정지까지 항상 부착되어 있는 것으로 해석하였다.

유도전동기는 유도성 부하로서 여자원이 제공되기 위해서는 무효전력이 필요한데 전원 측으로부터 공급받을 경우 피

[†] 교신저자, 正會員 : 江陵大學校 電氣情報通信工學部 教授 · 工博
E-mail: jgkim@kangnung.ac.kr

* 正會員 : 江陵大學校 電氣情報通信工學部 教授 · 工博

** 正會員 : 忠南大學校 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2008年 5月 20日

最終完了 : 2008年 6月 24日

상전력이 증가하지만, 전동기 측 가까운 곳에 커패시터를 설치하여 부하에 필요한 무효전력을 공급할 경우 피상전력이 감소하므로 역률이 개선될 수 있다. 소용량의 경우 역률 보상을 위해 한곳에 설치하는 경우도 있지만, 본 연구 설비와 같이 대용량의 여러 부하 중에 운전하는 부하에만 보상이 이루어지기 위해서는 개별 보상제어가 유리하다.

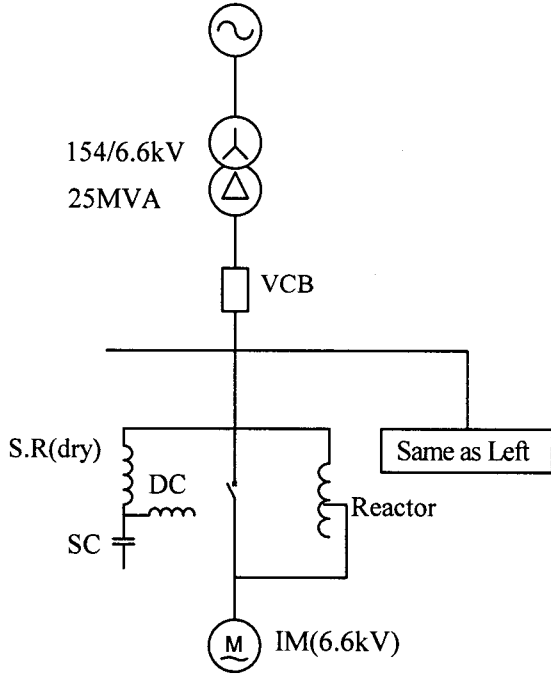


그림 1 단선결선도
Fig. 1 Single line diagram

그림 1에 적용되는 특고압 변압기 및 유도전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 변압기 및 전동기 파라미터
Table 1 Parameters of Transformer & Motor

변압기		전동기	
변압비	154kV/6.6kV	전압	6.6kV
용량	20/25MVA	용량	3,900kW
%Z	10.27	극수	12
여자전류	0.5%	당초역률	84%
무부하손	20kW	목표역률	95%
부하손	75kW	효율	97.2%
효율	99.6%	회전수	592[rpm]

그림 1에서 역률 보상 커패시터의 용량은 유도전동기의 역률이 84%이므로 이를 95%로 개선하기 위해서는 1,500[kVA]의 커패시터가 요구된다. 커패시터에 직렬로 설치되는 리액터의 경우 5고조파 저감을 위해서는 4%이지만 실제 여유 등을 고려하여 대개 6%로 선정하여 90[kVA]를 선정하였다. 커패시터 전단에 부착하는 리액터의 경우 3상이지만, 커패시터는 단상으로 3개 또는 6개를 Y결선으로 구성하고 있다.

대용량의 유도전동기를 리액터 기동 운전할 경우 리액터의 용량산정이 필요하다. 리액터의 탭은 대부분 50%, 65%, 80%의 3가지가 이용되고 있다. 이 3가지 탭의 리액턴스 값은 특성해석에 필요하다.

기동전류 I_{st} 와 탭 α 값이 결정될 경우 리액터의 탭전류 I_{tap} 는 다음과 같다.

$$I_{tap} = \frac{\alpha}{100} \times I_{st} \quad (1)$$

리액터 탭전압 V_{tap} 는 정격전압 V 와 탭 선정값에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{tap} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times V \times (100 - \alpha)\% \quad (2)$$

위 두 식으로부터 탭 임피던스 Z_{tap} 가 얻어지므로 기동리액터의 인덕턴스 $L_{reactor}$ 는 다음과 같다.

$$L_{reactor} = \frac{Z_{tap}}{\omega} \quad (3)$$

역률 보상장치의 사용전후 유효전력(P), 무효전력(Q), 피상전력(S) 및 역률(pf)의 변화는 식 (4)와 같이 전압 및 전류로 간단하게 구할 수 있다.

$$P = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \quad (4)$$

$$Q = \frac{\{(V_c - V_b)I_a + (V_a - V_c)I_b + (V_b - V_a)I_c\}}{\sqrt{3}}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$pf = \frac{P}{S}$$

그림 1에서 우측에 연결되어 정상 운전되고 있는 같은 용량의 유도전동기 및 역률 보상설비의 파라미터도 정상운전 조건에 맞추어 계산하면 정상 운전중에 기동되는 유도전동기의 특성해석이 가능하다.

역률 보상 커패시터에 리액터를 연결할 경우 커패시터의 단자전압 V_{cap} 은 식 (5)와 같이 약간 상승하기 때문에 커패시터 전압선정에 주의해야 한다.

$$V_{cap} = \frac{100}{100 - \%L_{비용}} \times V \quad (5)$$

역률 보상장치의 리액터에 걸리는 전압은 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{react} = \frac{V}{\sqrt{3}} \times \%L \quad (6)$$

3. 동작 특성 해석

정격속도에서 유도전동기의 역률은 대부분 90%이하이다. 유도전동기는 공칭 정격이하에서 운전되는 경우가 많으므로 역률이 실제 약간 낮다[5]. 낮은 역률을 보상하기 위해 전동기 단자 가까운 곳에 역률 보상 커패시터를 연결할 경우 개폐동작 또는 리액터 절체 운전 등에 의해 전동기 및 커패시터 시스템에 전압 및 전류 스트레스를 일으킬 수 있다. 이

와 같이 기동용 리액터의 전 후단에 역률 보상설비를 설치할 경우 기동용 리액터에서 전전압으로 절환 운전되는 정상 속도부근에서 또는 전동기 정지시의 변화를 전자계과도해석 프로그램을 이용하였다[7].

그림 2는 기동에서 정상운전까지의 유도전동기의 역률을 나타낸 것으로서 기동시는 약 40% 전후로서 정상운전에 비해 매우 낮은 역률을 나타내는 것을 알 수 있지만, 정상운전에서 보면 커패시터 설치 전(○) 84%에 비해 설치 후 역률(□)은 96%로서 당초보다 12% 정도 높게 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

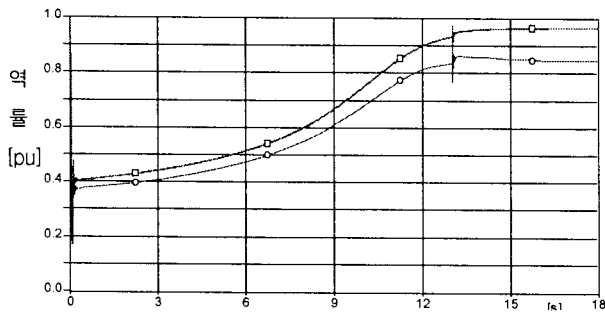


그림 2 보상 전/후의 역률
Fig. 2 Power factor before/after compensation

그림 3은 역률 보상을 커패시터에서의 전압을 나타낸 것으로서 식 (5)에서와 같이 리액터를 추가한 경우 회로전압에 대해 약 6%정도의 전압이 상승(3788[V]→4028[V])하기 때문에 역률 보상 커패시터의 전압선정시 회로전압보다 약간 높은 전압정격 선정이 필요하다.

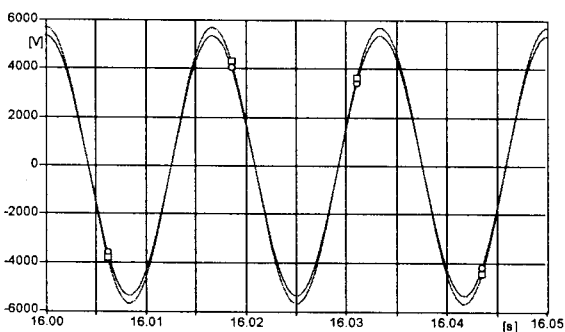


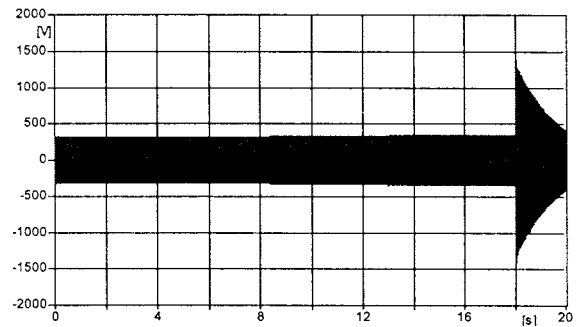
그림 3 커패시터 전압
Fig. 3 Capacitor Voltage

본 연구에 사용되고 있는 고압 유도전동기의 경우 기동에서 정상운전에 도달하는 시간은 약 13초로서 리액터 기동 후 약 13초에서 리액터를 절체하여 운전하고서 18초에는 정지하는 것으로 설정하였다. 역률 보상설비는 처음부터 전동기에 필요한 무효전력을 제공할 수 있도록 기동과 동시에 전원이 인가될 수 있도록 하였다.

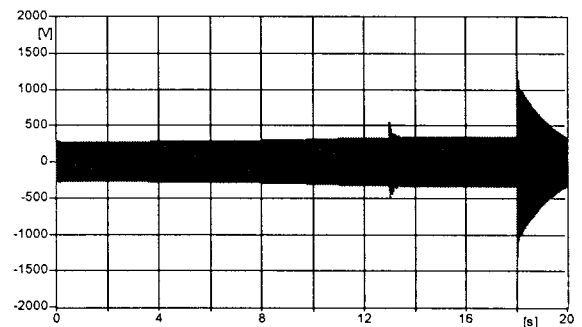
기동 및 정지시 역률 보상 설비의 위치에 따른 전압 및 전류 특성변화를 해석한 결과는 다음과 같다.

그림 4와 6은 리액터의 전압 및 전류파형을 나타낸 것으로서 3상중 가장 큰 값을 표시하였다.

3.1 역률 보상을 리액터



(a) 전단 설치



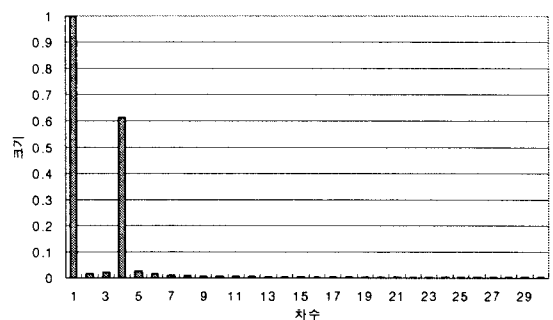
(b) 후단 설치

그림 4 리액터 전압

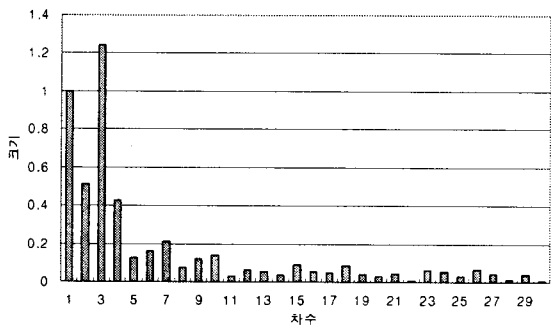
Fig. 4 Reactor Voltage

그림 4는 리액터에 나타나는 전압파형으로서 두 가지 모두 정상속도로 운전하는 경우 전압의 크기는 동일하지만 리액터 절체와 정지시 전압에 약간의 차이가 존재한다. 정상 속도부근에서 리액터를 개방할 때 보상설비를 전단에 설치하여 운전할 때 보다 후단에 설치한 경우 전압의 크기의 정상운전에 1.4배로 높고, 전동기를 정지할 경우 전압은 순간적으로 3.7배까지 도달한 다음 차츰 감쇠하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 정지시에 높은 전압이 나타나는 것은 스위칭전압으로서 리액터에 전압스트레스로 작용할 수 있다.

그림 5는 그림 4(b)의 절체 및 정지 순간의 전압 고조파를 분석한 결과이다.



(a) 절체시



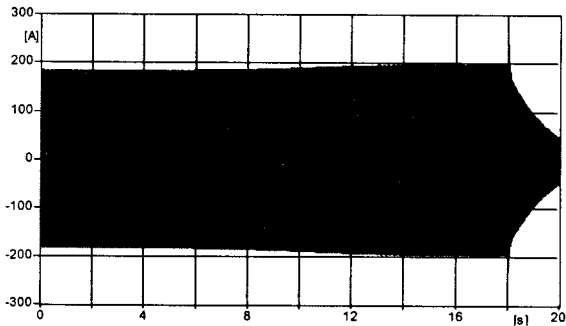
(b) 정지시

그림 5 그림 4(b)의 전압 고조파

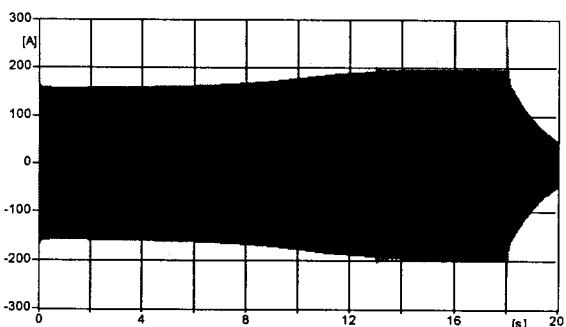
Fig. 5 Voltage harmonics of Fig. 4(b)

그림 5에서 알 수 있듯이 리액터에 기동에서 전전압으로 전환되는 경우 4고조파가 높게 나타나며, 전동기의 정지시는 3고조파 전압성분이 기본파보다 높게 나타남을 확인할 수 있다. 정지시가 운전시 정상전압으로 전개될 때 보다 높은 고조파 성분이 전개됨을 알 수 있다. 이와 같은 고조파전압 성분은 전류에도 영향을 줄 수 있다.

그림 6은 역률 보상을 커패시터에 부착되어 있는 리액터에 흐르는 전류의 변화를 나타낸 것이다.



(a) 전단 설치



(b) 후단 설치

그림 6 리액터 전류

Fig. 6 Reactor Current

그림 6(a)에서와 같이 역률보상설비를 기동용 리액터전단에 설치하고 운전하는 경우 정상 운전시에 흐르는 전류에 비해 후단에 설치하고 운전하는 경우 그림 6(b)에서와 같이

기동에서 정상 운전에 이르기까지 전류는 앞단에 설치 운전하는 경우에 비해 약간 전류값이 낮게 나타난다. 그러나 정지시 순간적으로 높은 전류값을 나타낸다.

그림 7은 그림 6의 정지시 순간적으로 흐르는 높은 전류에 대한 고조파 분석결과이다. 대부분 저차이지만, 3조파가 높게 나타나고 있다.

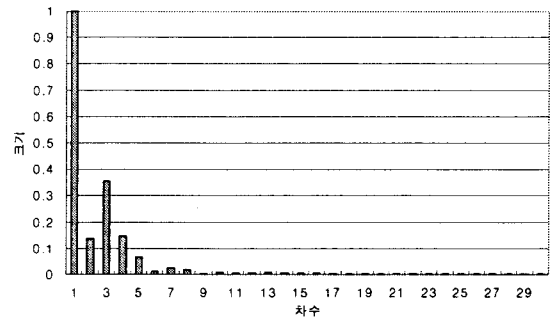
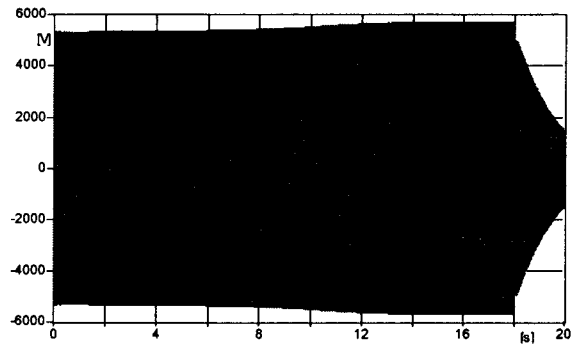


그림 7 정지순간 리액터 전류 고조파

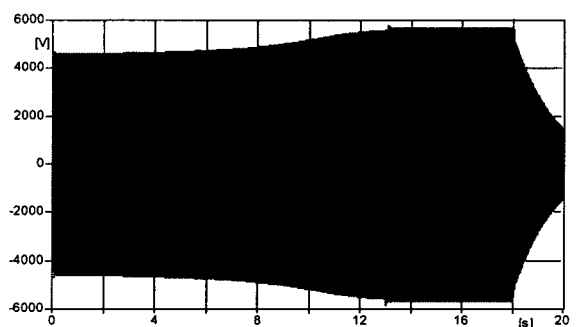
Fig. 7 Harmonics of reactor current at stop

3.2 역률 보상용 커패시터

그림 8은 콘덴서에 걸리는 전압의 변화를 나타낸 것이다.



(a) 전단 설치



(b) 후단 설치

그림 8 콘덴서 전압

Fig. 8 Condenser voltage

그림 8(a)에서와 같이 리액터 전단에 설치하여 운전하는 경우 콘덴서에 걸리는 전압에 비해 리액터 후단에 설비를 설치하고 운전하는 그림 8(b)와 같이 기동시가 정상운전에

비해 낮은 전압이 나타남을 확인할 수 있다. 그러나 정상 운전시 모두 전압의 크기는 일정하다.

그림 9는 리액터 기동방식에서 역률 보상설비를 리액터의 전 후단에 설치하여 운전하는 경우 콘덴서 전류의 변화를 나타낸 것이다.

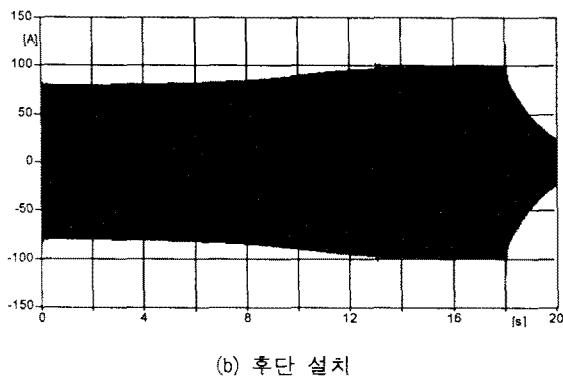
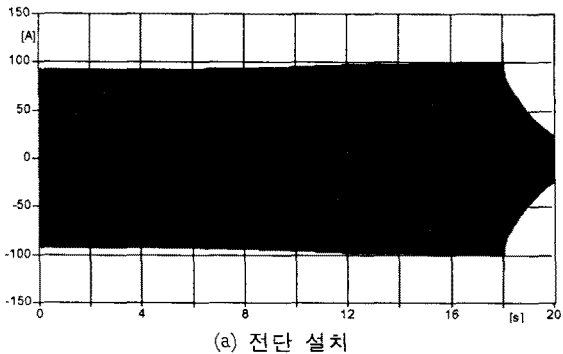


그림 9 콘덴서 전류
Fig. 9 Condenser current

그림 9에서도 기동용 리액터 후단에 역률보상설비를 설치하고 운전하는 경우 전단에 설치하여 운전하는 것에 비해 기동에서 정상속도에 도달할 때 전류가 낮은 값을 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 정지시의 전류변화는 전단 설치나 후단 설치 모두 같은 전류 형태를 유지하고 있다. 정지시의 전류 성분에 대한 고조파 분석은 그림 10과 같은데 3고조파 성분이 2 및 4의 짝수 고조파성분에 비해 다소 높게 나타나고 있다.

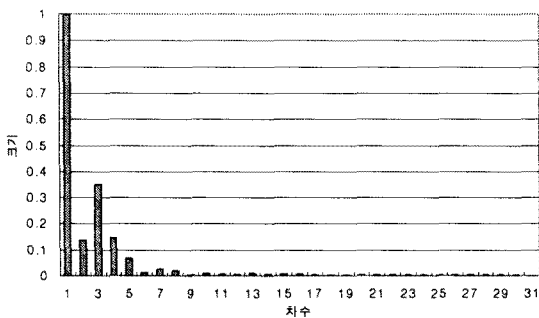


그림 10 정지시 전류 고조파
Fig. 10 Harmonics of condenser current at stop

표 2는 리액터 전 후단에 역률 보상 설비를 설치한 경우에 대한 전력 및 역률을 비교분석한 것이다. 후단에 설치하여 운전하는 경우가 출력이 약간 증가하는 것으로 나타나지만, 이에 따른 무효전력이 증가하므로 피상전력도 함께 증가하여 역률이 낮아진다. 따라서 전력특성에는 전단, 후단에 설치 운전하는 경우 정상 운전시 변화를 거의 고려하지 않아도 될 정도라고 판단된다.

표 2 리액터 전후 설치시의 특성값

Table 2 Characteristic parameters by reactor installation position

구분	리액터 전단	리액터 후단
P[W]	3.886E6	3.967E6
Q[Var]	9.871E5	1.013E6
S[VA]	4.009E6	4.095E6
PF	0.969	0.9687

4. 결 론

본 논문에서는 대형 펌프 설비의 리액터 기동 운전방식에서 역률 보상설비를 리액터의 전 후단에 설치하고서 기동 또는 정지시 발생하는 전압 및 전류의 변화를 해석하였다.

유도전동기의 운전시 낮은 역률을 보상하기 위해 리액터 및 커패시터로 구성된 역률 보상설비에서 리액터에 흐르는 전류는 기동 리액터의 설치에 관계없이 거의 비슷한 특성을 나타내지만, 리액터 전압의 경우 투입시 보다는 전환시, 전환시 보다는 정지시에 매우 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 특히 정지시의 전압성분에서 기본파 전압보다 높은 성분이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 이 전압은 스위칭 전압으로서 반복적으로 이루어지기 때문에 리액터에는 전압 스트레스로 작용함을 알 수 있다. 역률 보상설비에서 커패시터의 경우 기동용 리액터의 전단이나 후단 모두 비슷한 동작특성을 나타내고 있음을 확인하였다. 정지시 리액터 및 커패시터에 발생하는 3조파를 줄이기 위해서는 추가적인 필터의 설계가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구결과는 기동 정지를 자주 반복하는 고압 유도전동기 운전시스템에서 리액터 기동방식에서 발생하는 역률보상설비의 리액터 부분에서 고장이 자주 발생하는 원인을 줄일 수 있는 자료가 될 것이다. 따라서 빈번하게 이루어지는 정지동작시의 리액터에서의 전압 스트레스를 줄일 수 있는 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 전력산업 연구개발 사업으로 수행한 것의 일부입니다.(과제번호 : R-2007-3-186)

참 고 문 헌

[1] Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitor", Taylor & Francis, 2005

- [2] C A Worth, "Power Capacitor Handbook", British Library, 1984
- [3] 大森武司의 1인, "전력용 콘덴서", 電氣書院, 昭和40年
- [4] 이은춘의 6인, "고압 유도전동기의 역률 개선을 위한 콘덴서 위치 선정방안", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.97-99, 2005. 7
- [5] 김일중, 김종겸, "불평형 전압 운전시 역률 보상용 커패시터의 특성 연구", 대한전기학회 논문지, 제 57(P)권, No.1 pp.36-40, 2008. 03
- [6] 김종겸, 박영진, 이은웅, "불평형 전압 동작시 전력 커패시터 특성 분석", 한국조명전기설비학회 논문지, 제 22권, 5호, pp.64-72, 2008. 5
- [7] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.

저 자 소 개



김종겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~현재 강릉대학교 전기정보통신공학부 교수. 현재 당학회 B부문 재무이사

Tel : 033-760-8785

E-mail : jgkim@kangnung.ac.kr



박영진 (朴永鎭)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~현재 강릉대학교 전기정보통신공학부 교수.

Tel : 033) 760-8784

E-mail : popspark@kangnung.ac.kr



이은웅 (李殷雄)

1944년 8월 14일생. 1971년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1982년~83년, 1984년~85년 캐나다 McGill 대학 방문교수. 1987년~현재 당학회 평위원. 1995년 당학회 편집위원장 및 전기기연구회 간사장. 1995년~1997년 충남대 공대 학장, 산업대학원장('96~97), 1997년~2000년 당학회 부회장. 2004년도 당학회 회장, 현재 충남대 전기공학과 교수

Tel : 042-821-5652

E-mail : ewlee@cnu.ac.kr