

負荷轉流式電流形인버터 시스템의共振解析

심 천 보 ◦ 정 승 기
광운 대학교

Resonant Analysis of Load Commutated Current Source Inverter System

Sim Cheon-Bo Jeong Seung-Gi
Kwangwoon University

Abstract

At LCCSI system, output capacitor of inverter and inductor of load motor raise mutuality operation. This parallel resonant increase equivalent impedance of inverter load and give wrong effect at LCCSI system. This paper carried out resonant analysis of LCCSI system. The result of analysis, particular resonant point of two was discovered that α resonant of $S = 0$ vicinity and β resonant of $S = 1$ vicinity. In addition to, the case of harmonics resonant not come from α resonant but come from β resonant. A moment of working of LCCSI system, resonant line must not suddenly variation. Accordingly, resonant line is a necessity for doing f vicinity by properly capacitor value selection.

1. 서론

고압 대용량 인버터에 적합한 회로 시스템으로 그림 1 과 같은 동기 전동기용 부하 전류식 인버터(Load Commutated Inverter)를 응용한 유도 전동기용 부하 전류식 전류형 인버터(Load Commutated Current Source Inverter, 이하 LCCSI)가 주로 미국의 전기기기 제조 회사들에 의하여 개발되어 Pump, Fan, Blower 등 대용량 유체 이송 제어 장치에 응용되고 있다. [1][2]

이때, 인버터 출력단의 출력 캐패시터는 유도 전동기에서 필요로 하는 여자 전류를 공급함과 동시에 인가되는 전압, 전류를 평활시켜 주고, 전류 단속시 유도 전동기의 누설 리액턴스에 저장된 에너지를 흡수하는 역할과 부하 역률을 보상하여 캐패시터 용량에 의해 결정된 임계 주파수(f_c) 이상에서 부하 전류(Load Commutation)가 가능하도록 한다. [3] 그런데 출력 캐패시터와 부하 전동기가 병렬로 연결되어 있어서 전동기가 갖는 유도성 리액턴스와 캐패시터의 용량성 리액턴스가 상호 작용, 병렬 공진이 일어나면 콘덴서를 포함한 인버터 부하의 등가 임피던스가 크게 상승하므로 주어진 전류에서 큰 전압이 나타나 시스템의 안전에 커다란 영향을 끼칠수 있다. 따라서 이러한 공진 현상을 해석, 예측하고 이에 대한 적절한 해결책을 모색 하였다.

II. LCCSI 시스템의 공진해석

인버터 출력단의 출력 캐패시터와 유도 전동기의 인덕터가 상호작용, 병렬공진이 일어나면 캐패시터를 포함한 인버터 부하의 등가 임피던스가 크게 상승하므로 주어진 전류에서 큰 전압이 나타나 시스템의 안전에 영향을 미친다.

실제에 있어서는 인버터 직류측 인덕턴스 L_r 가 무한대가 아니므로 공진시 부하 임피던스의 상승은 인버터 출력 전류를 더 이상 일정하게 유지시키기 어렵게 하고 컨버터와 인버터의 제어루프와 상호작용, 시스템의 안정도를 해치는 결과물 초래할 수도 있다.

한편 인버터 출력 전류는 기본파 주파수 성분 뿐만 아니라 고조파 전류를 포함하고 있으므로 고조파 주파수 성분에 의한 공진도 수반되어 문제가 복잡해진다. 이때 고조파 성분은 인버터의 6스텝(Step) 동작에 의해 야기되는 인버터 특성 고조파(Characteristic harmonics)와 컨버터 출력전압에 포함된 컨버터 특성 고조파 성분으로 나누어 생각할 수 있다.

인버터 고조파는 인버터의 동작 주파수에 의해 결정되며 그 크기는 쉽게 예측할 수 있다. 컨버터 고조파는 인버터 주파수와 무관하게 항상 전인 주파수의 6배 주파수로 주어지고 그 크기는 부하의 운전조건에 의해 결정된다.

1. 유도 전동기의 등가 임피던스

공진 현상을 해석하기 위해서는 전동기의 임피던스에 대하여 충분히 검토할 필요가 있다.

그림 2의 유도 전동기 등가 회로에서 어떤 주파수에 대한 등가 입력 임피던스는 다음과 같이 주어진다.

$$R = R_s + \frac{(R_r/S)X_m^2}{(R_r/S)^2 + X_r^2} \quad (1.1)$$

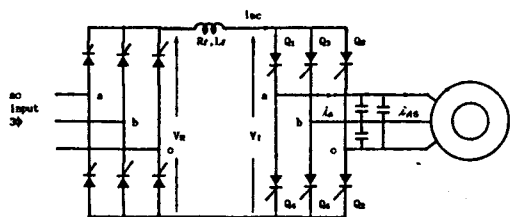


그림 1. 부하 전류식 전류형 인버터 - 유도 전동기 시스템

$$L = X_s - \frac{X_r X_m^2}{(R_r/S)^2 + X_r^2} \quad (1.2)$$

여기서 그림 2의 등가 회로를 그림 3과 같이 직렬 R-L 회로로 나타낼수 있다.

식 (1.1), (1.2)에서 R 과 X는 전동기 상수의 비선형 함수로 주어지므로 전동기의 운전주파수와 슬립에 따라 변한다. 따라서 전동기의 등가 입력 저항과 인덕턴스를 계산하는데는 동작 주파수와 슬립이 동시에 고려되어야 한다.

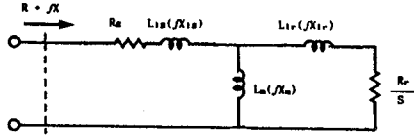


그림 2. 유도 전동기 등가 회로

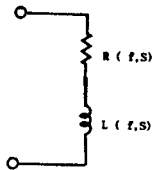


그림 3. 유도 전동기의 직렬 등가 R-L 회로

2. 캐패시터 - 유도전동기 시스템의 공진

2.1 임피던스 특성

그림 4는 전동기 입력단에 신간 450μF의 캐패시터를 병렬 접속 하고 유도 전동기 및 인버터의 제 정수가 표 1 과 같을 때 전동기 임피던스에 대한 캐패시터를 포함한 전체 입력 임피던스 특성을 보여주고 있다.

그림 4 로 부터 전동기의 무부하 상태 (S = 0)에서 약 16Hz 부근에 이르러 공진현상이 나타난다. 부하가 증가하여 슬립이 증가하면 공진시 임피던스는 크게 감소하나 전부하 상태 (S = 0.03) 이상에 이르기까지도 공진 주파수는 거의 변화하지 않는다.

슬립이 0.1 이상으로 증가하면 공진 임피던스의 크기는 그다지 변화하지 않고 대신에 공진 주파수가 상승하여 S = 0.4 부근에 이르면 다시 공진 주파수가 일정하여 지고 슬립의 증가에 따라 공진 임피던스는 증가한다. 여기서는 S = 1 까지만 도시 하였으나 S → ∞ 에 이르기까지도 공진임피던스는 S = 1 의 경우에 비해 약간 더 증가할 따름이다.

이상에서 두개의 특이한 공진 현상을 관찰할 수 있다. 즉, 슬립이 작은 영역에서의 공진과 슬립이 큰 영역에서의 공진이다. 이하에서는 전자를 "α공진", 후자를 "β공진"이라 명명하고, 각각에 대한 공진 주파수를 fα, fβ로 나타낸다. fα와 fβ는 전동기의 전운전 영역에서 나타나는 양극단을 나타낸다.

표 1. 유도전동기 및 인버터의 제정수

Type	: 농형	Rs	: 0.41 Ω
용량	: 3φ 208V, 60Hz, 10hp	Lir	: 3.84 mH
결선	: Delta	Lm	: 67.00 mH
극수 P	: 4	관성모멘트 J	: 0.54kg·m ²
정격슬립	: 3.3 %	직류리액터 Lr	: 40.0 mH
Rs	: 0.49 Ω	인버터 출력 캐패시터 C	: 450 μF in Y
Lis	: 2.22 mH		: 1350 μF in Δ

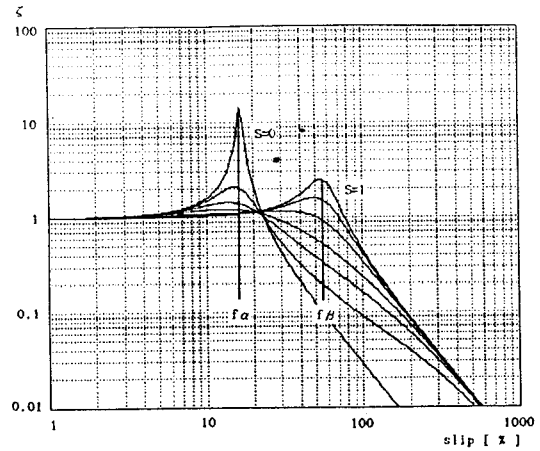


그림 4. 전동기 임피던스에 대한 전체 임피던스 비

2.2 α, β 공진의 해석

순수한 병렬 공진 회로 예시의 공진 주파수와 리액턴스 크기는 각각 식 (2.1), (2.2)와 같다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (2.1)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.2)$$

또한, 실제적인 병렬 공진 회로를 고려하기 위해 resonant factor(η)를 식(2.3)과 같이 정의 하면

$$\eta = \sqrt{1 - \left(\frac{R}{Z_0}\right)^2} \quad (2.3)$$

이다.

캐패시터-유도 전동기 시스템의 공진 특성을 해석하기 위해 S=0과 S=1의 경우에 대한 간략화된 표현법을 사용한다.

S = 0 일때는 유도 전동기의 회전자 임피던스를 ∞로 하여 그림 5와 같이 표현할 수 있고 등가 저항과 인덕턴스는

$$R = R_s \quad (2.4)$$

$$L = L_{is} + L_m = L_s \quad (2.5)$$

이다.

실제의 유도 전동기에서 Rs는 공진시 리액턴스 Xs(=ωLs)에 비해 훨씬 작은 값이므로 대부분의 경우 resonance factor를 거의 1로 간주할 수 있다.

따라서 α공진에서의 공진 주파수는

$$f_\alpha = \eta \cdot f_0 \approx f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C}} = 16.5 \text{ Hz}$$

이때의 용량성 및 유도성 리액턴스는

$$X_c = X_m = Z_0 = \sqrt{\frac{L_s}{C}} = 7.16 \Omega$$

그리고 α공진에서의 전체 입력 임피던스는

$$Z = \frac{L_s}{R_s C} = \frac{Z_0^2}{R_s} = 105 \Omega$$

이다.

S = 1일때 여자리액턴스를 무시한 근사적인 등가회로는 그림 6과 같다. 따라서

$$R = R_s + R_r \quad (2.6)$$

$$L = L_{is} + L_{lr} \quad (2.7)$$

이다. α 공진에서와 같은 과정으로 구한 값을 표 2에 나타내었다. 이상의 값들은 그림 4에서의 결과와 일치함을 실험

계 확인 할 수 있다.

표 2. α, β 공진의 해석 결과

	α 공진		β 공진
$R=R_s$	0.49 Ω	R	0.90 Ω
$L=L_s$	69.2 mH	L	6.06 mH
C	1350 μ F	C	1350 μ F
f_o	16.5 Hz	f_o	55.6 Hz
Z_o	7.16 Ω	Z_o	2.12 Ω
η	1.0	η	0.905
$f\alpha$	16.5 Hz	$f\beta$	50.3 Hz
$Z\alpha$	105 Ω	$Z\beta$	4.99 Ω

2.3 고조파 성분에 대한 임피던스 특성

LCCSI의 출력 전류는 $6m \pm 1 (m=1, 2, \dots)$ 차의 고조파 성분을 포함하고 있다. 이 고조파 성분의 주파수가 시스템의 공진 주파수와 일치하면 공진이 발생한다.

여기서 고조파 성분 회전자계에 대한 슬립은

$$S_k = \begin{cases} \frac{kn_1 - n}{kn_1} & \text{여기서, } k = 6m + 1 \quad (3.1-a) \\ \frac{kn_1 + n}{kn_1} & \text{여기서, } k = 6m - 1 \quad (3.1-b) \end{cases}$$

n_1 : 기본파 회전자계 속도
 n : 전동기 회전 속도

로 주어진다. 그림 7 은 고조파 성분에 대한 슬립이 속도의 전 영역에서 변화하는 것을 보여주고 있다. 슬립이 항상 1 부근에 머물러 있기 때문에 고조파 성분에 대한 회전자의 임피던스가 작아 여자 인덕턴스는 거의 기여를 하지 못한다. 따라서 고조파 성분에 대해서는 α 공진이 일어날 수 없으며, 고조파 공진시 등가 회로를 그림 6 의 β 공진 등가 회로로 근사시켜 생각할 수 있다.

그림 8 은 기본파 운전 주파수의 변화에 대하여 고조파 성분에 대한 임피던스 변화를 기본파 슬립 0 ~ 1 사이에서 도시한 것이다. 이로부터 다음과 같은 몇가지 사실을 알 수 있다.

- 첫째, 고조파 임피던스는 슬립에 거의 무관하다. (5차의 경우 최대 20% 가량의 변화)
- 둘째, 공진 임피던스의 크기는 고조파 차수에 무관하게 거의 같다. 그리고 그 값은 기본파에 대한 $S = 1$ 에서의 공진 임피던스와 같다.
- 셋째, 고조파 공진 주파수는 차수의 증가에 따라 감소한다.

위의 첫째, 둘째 사실로부터 그림 6 의 β 공진 회로로 고조파 공진 특성을 계산할 수 있음을 알 수 있다.

이때 공진시 임피던스는

$$Z_k = Z\beta \quad (2.9)$$

이며 k 차 공진이 일어나는 기본파 주파수를 f_k 라 할때

$$kf_k = f\beta \quad (2.10)$$

이어야 하므로

$$f_k = \frac{f\beta}{k} \quad (2.11)$$

이다.

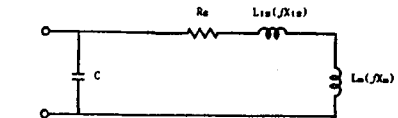


그림 5. α 공진 ($S = 0$) 에서의 등가 회로

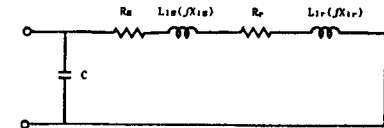


그림 6. β 공진 ($S = 1$) 에서의 등가 회로

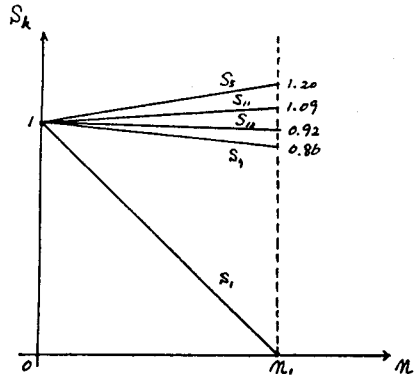


그림 7. 속도 변화에 대한 고조파 슬립의 변화

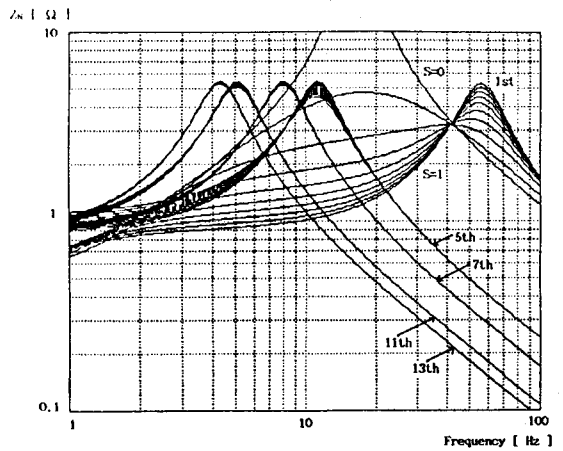


그림 8. 고조파 임피던스

2.4 캐패시터 용량의 영향

그림 9 는 운전 주파수와 전동기 슬립간에 공진 현상이 나타나는 지점을 표시한 것으로서 캐패시터 값이 미치는 영향을 함께 나타내고 있다. 전동기의 슬립이 증가함에 따라 공진 주파수는 $f\alpha$ 에서 $f\beta$ 로 서서히 이동하며 곡선의 좌상측은 캐패시터-유도전동기 시스템이 유도성으로, 우 하측은 용량성으로 작용하는 범위를 나타내고 있다. 문면서의 용량이 증가하면 공진 주파수는 전반적으로 감소하여 공진 임피던스도 감소하는 경향을 보인다.

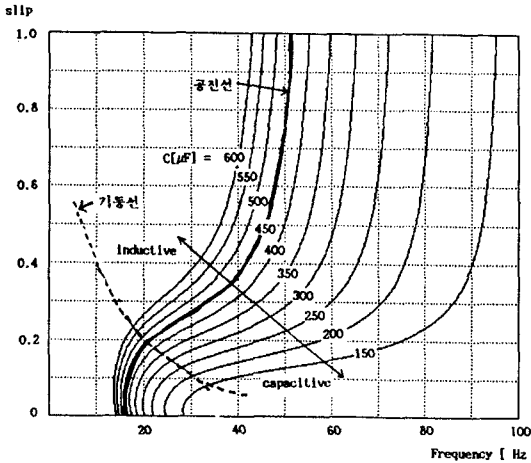


그림 9. 캐피시터 변화에 따른 공진선

I. 결론

LCCSI 시스템에서 인버터의 운전 주파수 변화에 따른 공진 현상의 발생은 부하의 용량성 및 유도성 동작의 분기점에서 나타나는 현상으로 피할수 없다. 정상 운전 상태에서 전동기는 최대 수 % 이내의 슬립으로 운전 되므로 이때의 공진은 α 공진의 지배를 받는다. 그러나 기동시에는 슬립이 비교적 크므로 α 공진과 β 공진 사이의 지점에서 공진이 일어날수 있다. 이때는 기동 과정에서 주파수와 슬립이 변화하는 궤적을 그림 9 상의 점선과 같이 중첩, 공진선과의 교점을 구함으로써 공진의 위치를 알아 낼 수 있다.

공진선은 LCCSI 시스템에서 강제 전류와 부하 전류간의 경계를 뜻하므로 기동을 포함한 전 운전 영역에서 공진주파수가 크게 변화하지 않는것이 바람직하다. 따라서 기동선과 공진선의 교점에서의 주파수는 $f\alpha$ 부근에 있도록 캐피시터의 용량이 선정될 필요가 있다. 그림 9 에서 보듯이 콘덴서의 용량이 작을수록 낮은 슬립 영역에서 공진 주파수가 급격히 변화하므로 캐피시터의 값은 어느정도 크게 잡아야 한다. 그러나 캐피시터의 값이 어느 이상이 되면 그 효과와 포화하므로 용량의 낭비가 초래된다.

한편 고조파 공진시에는 인버터의 dc측에 예기치 못한 전압 극성이 나타남으로 해서 강제 전류회로의 동작(forced commutation circuit)을 저해할수 있다. 이를 피하기 위해서는 인버터의 최저 동작 주파수를 $f\beta$ 이상이 되게 설정하는 방법을 생각할 수 있으나 이는 비교적 높은 주파수에서 기동을 시작하거나 캐피시터 용량을 크게 증가 시켜야 하는 부담을 주므로 현실적으로 적용이 어려울 것으로 생각된다. 따라서 고조파 공진이 제어 회로에 미치는 영향을 감소시키기 위해서는 전압 궤환 회로(Voltage feedback circuit)에 $f\beta$ 에 대한 notch filter가 사용될 필요가 있다.

參考文獻

- [1] I.D.Hassan, "A Guide for selection and Application of Large Adjustable Speed Drives", IEEE Ind.Appl.Soc.Conf., pp. 468 ~ 476. 1987.
- [2] 송중호, 윤태웅, 김광배, "유도 전동기용 負荷 轉流式 電流形 인버터의 해석" 대한전기학회 89 추계 학술대회 논문집, pp. 313 ~ 316.
- [3] 목형수, 설승기, "GTO - 직류 전원을 병용한 부하 전류식 전류형 인버터에 관한 연구", 대한전기학회 90 추계 학술대회 논문집, pp. 591 ~ 595.
- [4] 송중호, 윤태웅, 김권호, 김광배, "負荷 轉流式 電流形 인버터 - 유도 전동기 시스템의 제어 특성" 전기학회 논문지, 제 39권 10호, pp. 1029 ~ 1036, 1990.10.
- [5] H.W.Jackson, P.A.White III, *Introduction to electric circuit*, Prentice - Hall, 1989.