

고조파 전압원에 대한 직렬형 능동전력필터의 새로운 제어법

*고수현 **신재화 *김영석
*인하대학교 **인천전문대학

**A New Control Method of Series Active Power Filter
with Harmonic Voltage Source**

*Soo-Hyun Ko **Jae-Hwa Shin *Young-Seok Kim
*Inha University **Incheon City College

Abstract - This paper introduces a control method of series active power filter that compensate harmonic currents and eliminate a neutral line current in 3 phase 3 wire and 3 phase 4 wire power system with harmonic voltage source. These harmonic currents and neutral line current are caused by a nonlinear loads such as diode rectifiers and thyristor converters. Proposed method extracts a voltage reference directly from performance function without phase transformation. Therefore, the control method is simpler than any other conventional methods. Experimental results for 3-phase 3-wire and 3-phase 4-wire series active power filter system were shown to verify the effectiveness of this control method.

1. 서 론

SMPS, UPS, 컴퓨터시스템 등 thyristor나 diode 정류기와 같은 반도체 전력변환장치를 사용하는 부하는 비선형 부하로 동작하여 전원측에 심각한 고조파를 발생시키는 주요한 원인이 된다. 이러한 고조파 전류는 전원 전압의 왜곡 및 발전기, 송전선, 변압기 등과 같은 전력계통 장치들의 용량증대를 가져오며, 전기기기, 케이블, 진상 콘덴서 등 각종 전력장치들에 열 및 진동을 발생시켜서 절연파괴나 수명 단축을 야기할 수 있다. 그리고, 계측장비와 같은 각종 전자장치의 오동작이나 통신 시스템에 EMI현상을 야기하며, 전동기에 이상 진동 토크를 발생시키고 철손, 동손 등의 손실을 증대시키게 된다. 상업용이나 업무용 빌딩, 공장등에 주로 채택되는 3상 4선식 시스템인 경우는 이러한 고조파 전류 외에도 비선형부하에 의해서 중성선에 과도한 전류가 흐르게 되는데, 이러한 과도한 중성선 전류는 또한 변압기와 중성선의 과부하나 상전압이 불안정하게 되는 주요한 원인이 된다.[3]

이러한 고조파와 중성선 전류의 문제를 해결하기 위한 방법으로 여러 형태의 수동필터와 직·병렬 능동필터가 소개되어 왔다.[1-7]

고조파제거를 위해 사용되는 수동필터는 저가이지만 특정 차수의 고조파만을 선택적으로 보상할 수 있기 때문에 전원단에 광범위한 차수의 고조파가 발생할 경우에는 그다지 만족할 만한 성능을 얻기 힘들고, 전원 측 임피던스와 직렬공진을 일으킬 가능성을 항상 내재하고 있다. 이러한 수동필터의 단점을 보완하기 위해 능동필터가 개발되었다. 능동전력필터에는 보상 전류를 주입해주는 병렬형과[1] 보상전압을 주입해주는 직렬형[6], 그리고 수동필터와 능동필터를 병용하는 방식등[2]이 주로 개발되어 왔다.

이러한 능동전력필터 중 지금까지는 주로 병렬형 능동전력필터에 대한 연구가 활발히 진행되어왔고, 산업현장

에 널리 채택되었다. 하지만, 병렬형 능동전력필터는 단지 고조파 전류원 보상에만 적용할 수 있다. 그러나 최근에는 UPS, 전자 안정기, 컴퓨터 시스템의 전원장치 등 정류기의 dc측에 필터 커패시터를 갖는 전력전자 장치들이 증가하고 있다. 이러한 장치들은 고조파 전압원으로 동작하기 때문에 고조파 전류원만을 보상하는 병렬형 능동필터는 컴퓨터시스템, UPS등의 고조파 전압원에는 적용할 수 없게된다. 따라서, 급속히 증가하고 있는 고조파 전압원에 대한 보상을 효과적으로 수행할 수 있는 직렬형 능동전력필터에 대한 중요성이 점점 증가하고 있다.[7]

본 논문에서는 고조파 전압원 부하를 가지는 3상 3선식과 3상 4선식 직렬형 능동필터에 대한 제어 알고리즘에 대해서 다룬다. 이 제어법은 상변환 없이 보상기준전압을 직접 추출해 범으로 써 기존의 제어법보다 더 간단하고, DSP를 사용해서 보상기준전압을 연산해 내는 시간을 단축시킬 수 있기 때문에 무효전력의 실시간 제어에 더 근접할 수 있는 요건을 제공해 주어 능동필터의 성능개선에 기여하게 된다.

제안된 제어법의 유효성을 입증하기 위해서 3상 다이오드 정류기 부하를 가지는 3상 3선식 전력시스템과 단상 다이오드정류기 부하 세 개를 사용한 3상 4선식 전력시스템에 대해서 실험을 수행하였고, 실험결과들을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 3상 3선식 직렬형 능동필터에서의 보상원리

본 논문에서 제안하는 알고리즘에서는 순시무효전력은 부하에서 발생하는 무효전력 대신에 능동전력필터에서 발생된 각 상의 전력을 순시 무효전력으로 정의 한다. 이것은 능동전력필터가 순시 유효전력을 발생하지 않기 때문에 유효하다. 따라서 순시 무효전력 q_k 는 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_k = v_{Ck} \cdot i_{Sk} \quad (k = a, b, c) \quad (1)$$

식 (1)에서 k 는 각 상을 나타내는 a, b, c 이며, v_{Ck} 는 직렬형 능동전력필터가 생성하는 각 상의 보상전압, i_{Sk} 는 각 상의 전원 전류를 나타낸다.

직렬형 능동전력필터는 순시 유효전력을 발생하지 않으므로 능동필터에서 발생되는 모든 전력은 부하로 전달되지 않고 상사이에서 회전하는 무효전력성분이 된다. 따라서, 식 (1)을 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{Ca}i_{Sa} + v_{Cb}i_{Sb} + v_{Cc}i_{Sc} = 0 \quad (2)$$

본 논문에서 다루는 3상3선식 전력계통의 경우는 중

성분이 존재하지 않기 때문에, 전압과 전류의 영상분이 존재하지 않는다. 따라서, 직렬형 능동전력필터에서 발생하는 보상 전압은 다음 식 (3)을 만족한다.

$$v_{Ca} + v_{Cb} + v_{Cc} = 0 \quad (3)$$

직렬형 능동전력필터의 보상 전압은 식 (2)와 식(3)을 만족하면서, 다음에 정의하는 성능 함수를 최소화하는 전압으로 결정된다.

$$L = (v_{La} - v_{Ca})^2 + (v_{Lb} - v_{Cb})^2 + (v_{Lc} - v_{Cc})^2 \quad (4)$$

식 (4)의 성능함수에서 우변의 각 항들은 각 상 부하 입력전압과 보상전압의 차의 제곱의 형태를 갖기 때문에 성능함수가 최소가 되는 전원측 전압의 고조파 성분이 최소가 됨을 의미한다. 이 성능함수를 최소로 만드는 직렬형 능동전력필터의 보상 전압 v_{Ca} , v_{Cb} , v_{Cc} 는 식 (2)와 식 (3)을 이용하면서 식 (5)의 미분식을 통해 유도된다.

$$\frac{dL}{dv_{Ca}} = 0, \frac{dL}{dv_{Cb}} = 0, \frac{dL}{dv_{Cc}} = 0 \quad (5)$$

식 (2), (3), (5)를 통해 유도된 v_{Ca} , v_{Cb} , v_{Cc} 는 제안된 직렬형 능동전력필터의 보상 지령 전압으로 다음 식 (6)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} v_{Ca} &= \frac{\sqrt{3}(i_{Sb} - i_{Sc}) \cdot q}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})} \\ v_{Cb} &= \frac{\sqrt{3}(i_{Sc} - i_{Sa}) \cdot q}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})} \\ v_{Cc} &= \frac{\sqrt{3}(i_{Sa} - i_{Sb}) \cdot q}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(i_{Sb} - i_{Sc})v_{La} + (i_{Sc} - i_{Sa})v_{Lb} + (i_{Sa} - i_{Sb})v_{Lc}]$$

식 (6)은 식 (2)의 조건을 만족함으로써 얻어진 결과식이므로, 식 (6)의 q 는 기존의 'p-q 이론'에서의 순시 무효전력의 정의식[1]과 일치한다. 따라서, 보상 지령 전압 안에는 순시 무효전력의 직류성분과 교류성분을 모두 포함하고 있으며, 고조파만 보상할 경우 기존의 알고리즘과 마찬가지로 순시무효전력의 교류성분만을 보상분으로 사용하면 된다. 따라서, 고조파 보상을 위한 능동전력필터의 최종 보상 지령 전압은 다음 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} v_{Ca} &= \frac{\sqrt{3}(i_{Sb} - i_{Sc}) \cdot \tilde{q}}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})} \\ v_{Cb} &= \frac{\sqrt{3}(i_{Sc} - i_{Sa}) \cdot \tilde{q}}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})} \\ v_{Cc} &= \frac{\sqrt{3}(i_{Sa} - i_{Sb}) \cdot \tilde{q}}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 \tilde{q} 는 연산되어진 무효전력 q 로부터 저역통과 필터를 통해 q 의 DC성분을 필터링해내고 이를 다시 q 에서 빼줌으로써 무효전력의 교류성분 \tilde{q} 를 얻을 수 있다.

2.2 3상 4선식 직렬형 능동필터의 보상원리

3상 4선식 시스템인 경우는 부하전압과 상전류에 영상분이 존재할 수 있기 때문에 식 (3)을 적용할 수 없게된다. 따라서, 식 (6)또한 3상 4선식 시스템에는 적용이 불가능하다.

$$\begin{aligned} v_{Ca} &= v_{La} - i_{Sa} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \\ v_{Cb} &= v_{Lb} - i_{Sb} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \\ v_{Cc} &= v_{Lc} - i_{Sc} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (4)의 성능함수는 식 (8)의 전압에서 최소가 되는데 이 보상기준전압은 부하전압에서 순시유효전압을 빼줌으로써 얻을 수 있다.[8] 이 순시유효전압은 식(8)에서 처럼 전류의 벡터 norm을 이용해서 구할 수 있다. 식 (8)의 순시유효전력 p 는 다음 식 (9)와 같다.

$$p = v_{La} \cdot i_{Sa} + v_{Lb} \cdot i_{Sb} + v_{Lc} \cdot i_{Sc} \quad (9)$$

2.3 시스템 구성

그림 1과 그림 2는 제안된 알고리즘을 적용하기 위해 구성한 3상 3선식 직렬형 능동전력필터와 3상 4선식 직렬형 능동전력필터의 구성도를 보여준다. 3상 3선식 능동전력필터에서는 3상브리지 다이오드 정류기에 고조파 전압원으로 동작하는 R-C 부하를 연결하여 시스템을 구성하였고, 3상 4선식 능동전력필터에서는 단상브리지 다이오드 정류기 세 개를 각 상에 연결하여 시스템을 구성하였다. 3상 4선식 역시 R-C 부하를 사용하였다.

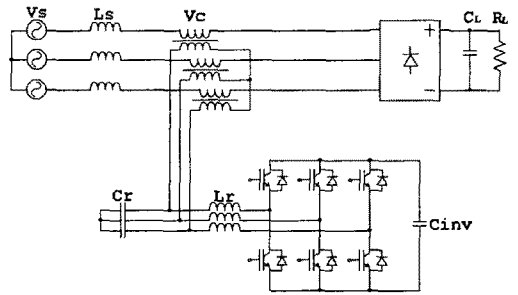


그림 1. 3상 3선식 직렬형 능동전력필터 시스템
Fig 1. 3-phase 3-wire series active power filter system

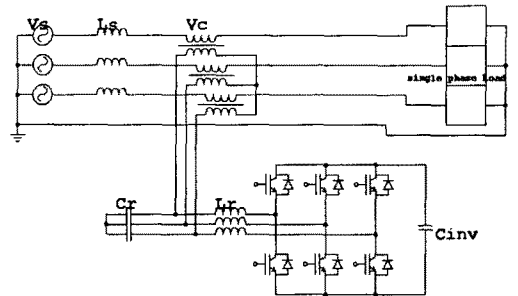


그림 2. 3상 4선식 직렬형 능동전력필터 시스템
Fig 2. 3-phase 4-wire series active power filter system

직렬형 능동전력필터는 3상 전압형 PWM 인버터를 교류 전원과 비선형 부하 사이에 3개의 결합변압기로 계통에 직렬 접속하여 구성하였다. 또한, 인버터의 출력 측에는 스위칭 리플을 저감시키기 위한 LC필터를 구성하였다.

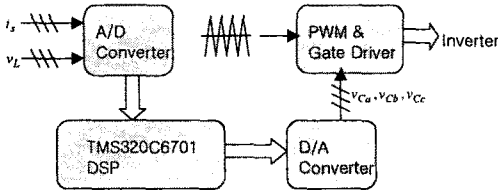


그림 3. 직렬형 능동필터 제어회로의 블록다이어그램
Fig 3. Block diagram of Series Active Power Filter's Control Circuit

그림 3에 직렬형 능동필터의 제어회로에 대한 블록다이어그램을 나타내었다. PT와 CT를 통해 $\pm 10(V)$ 의 전압 값으로 변환된 부하전압과 상전류가 A/D converter(AD976AA)를 통해 16bit의 digital 값으로 변환되어 DSP로 입력된다. DSP에서는 이를 실제 전압, 전류 값으로 변환한 후에 보상기준전압을 연산해내게 된다. 연산된 보상기준전압은 다시 D/A converter(AD7864)를 통해 analog 신호로 변환되어 PWM 발생회로로 넘겨지게 되고, PWM 회로에서 발생된 control signal이 gate driver를 거쳐 인버터를 구동시켜주도록 제어회로를 구성하였다. EXB841 IGBT drive IC를 사용해서 게이트 드라이버와 보호회로를 구성하였고, 능동전력필터의 정확하고 빠른 제어를 위해서 실시간 제어에 적합한 TI사의 TMS320C6701 floating point DSP를 사용하여 20[KHz]로 인버터를 구동하였다.

전원전압	150[Vrms](3P3W), 110[Vrms](3P4W) 60[Hz]
전원측 인덕턴스(LS)	0.1[mH]
결합변압기 권수비	1:1
부하 커패시턴스(CL)	1500[uF](3P3W), 2400[uF](3P4W)
부하 저항(RL)	60[Ω](3P3W) 20[Ω](3P4W)
인버터 DC링크 커패시턴스	2350[uF]
LC필터 인덕턴스(Lf)	4[mH]
LC필터 커패시턴스(Cf)	0.5[uF]

1. 시스템 회로정수
Table 1. System parameter

표 1에 구성된 시스템의 회로정수 값들을 나타내었다. 표에서 3상 3선식 직렬형 능동전력필터인 경우는 60옴, 1500(uF)의 R-C 부하를 갖는 3상 다이오드 정류기 부하를 사용하였고, 실효치 150[V]의 전원을 인가하였다. 3상 4선식인 경우에는 단상 다이오드정류기 세 개에 각각 20옴 방전저항과 2400[uF]의 커패시터를 연결하여 고조파 전압원을 구성하였다.

2.4 실험 결과

그림 4와 그림 5는 고조파 전압원을 갖는 3상 3선식

전력시스템에서의 보상전과 보상후의 A상 전류파형을 보여준다. 보상전에는 전류파형의 THD가 a, b, c상 각각 47.22%, 50.51%, 49.47%에 이르는 왜형파가 됨을 알 수 있었다. 그리고 보상후의 3상 전류파형과 각 상전류의 스펙트럼을 분석해보면 a, b, c상의 THD가 각각 4.75%, 4.52%, 4.83%로 IEEE-519의 고조파 규제치를 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

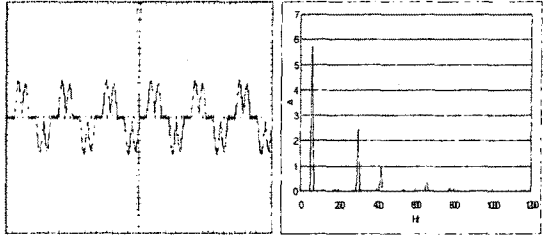


그림 4. 3상 3선식 전력시스템의 보상전 A상 전류파형과 A상전류의 스펙트럼
10(A/div), 10(ms/div)

Fig 4. A-phase current waveform and spectrum of the current before compensation in 3-phase 3-wire power system

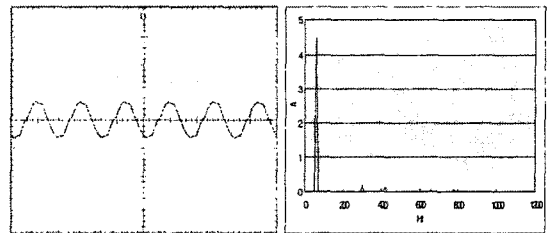


그림 5. 3상 3선식 전력시스템의 보상후 A상 전류파형과 A상전류의 스펙트럼
10(A/div), 10(ms/div)

Fig 5. A-phase current waveform and spectrum of the current after compensation in 3-phase 3-wire power system

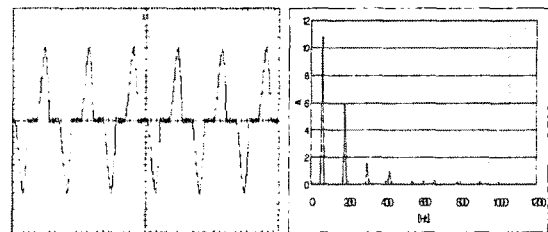


그림 6. 3상 4선식 전력시스템의 보상전 A상전류 파형과 A상전류의 스펙트럼
10(A/div), 10(ms/div)

Fig 6. A-phase current waveform and spectrum of the current before compensation in 3-phase 4-wire power system

그림 6과 그림 7은 3상 4선식 전력시스템에서 보상전의 A상전류와 중성선 전류파형을 보여준다. a, b, c상의 THD는 각각 57.29%, 57.20%, 57.75%이고 중성선 전류의 크기는 상전류 실효치 12.7(A)의 약 1.5

배인 18.6(A)가 된다. 그림 8과 그림 9는 보상후의 A상 전류와 A상전류의 스펙트럼, 중성선 전류파형을 보여준다. a, b, c상의 THD는 각각 2.72%, 2.55%, 3.19%로 역시 THD 5% 미만의 우수한 보상 성능을 보임을 알 수 있다. 그리고 중성선 전류의 크기는 피크치가 1(A)미만으로 보상전의 중성선 전류에 비해서 크기가 약 1/20 이하로 줄어들음을 알 수 있다.

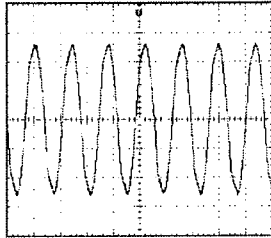


그림 7. 3상 4선식 전력시스템의 보상전 중성선 전류파형
10[A/div], 4[ms/div]

Fig 7. Neutral line current before compensation in 3-phase 4-wire power system

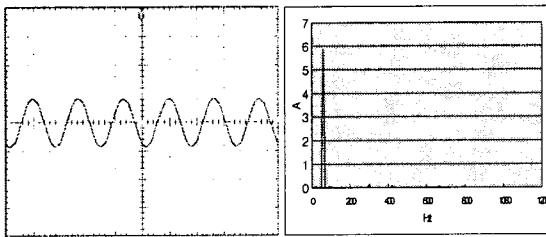


그림 8. 3상 4선식 전력시스템의 보상후 A상전류파형과 A상전류의 스펙트럼
10[A/div], 10[ms/div]

Fig 8. A-phase current waveform and spectrum of the current after compensation in 3-phase 4-wire power system

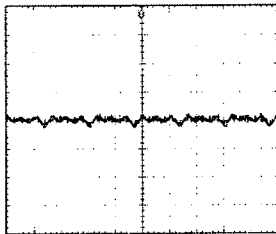


그림 9. 3상 4선식 전력시스템의 보상후 중성선 전류파형
2[A/div], 10[ms/div]

Fig 9. Neutral line current after compensation in 3-phase 4-wire power system

3. 결 론

본 논문에서는 고조파 전압원에 대한 직렬형능동필터의 제어 알고리즘을 제시하였다. 보상기준전압과 부하측

전압을 이용해서 성능함수를 정의하였고, 이 성능함수를 최소화하는 보상기준전압을 도출함으로써 전원단의 고조파를 제거할 수 있음을 보였다. 그리고, 3상 4선식 전력시스템의 중성선 전류를 저감시키는 데에도 제안된 알고리즘을 적용할 수 있음을 보였다. 또한 20(KHz)의 빠른 스위칭으로 인버터 구동을 실현시킴으로써 연산시간의 감소가 직렬형 능동필터의 보상성능을 개선시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다. 3상 3선식 직렬형 능동전력 필터와 3상 4선식 직렬형 능동전력필터에 대해서 실험을 수행하였고, 두가지 경우 모두 상전류의 THD가 5%미만인 우수한 보상결과를 얻을 수 있었다. 이러한 실험결과를 통해서 제안된 알고리즘의 유효성을 입증하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components." IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-20, NO.3, pp 625-630, 1984
- [2] F. Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae "A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems-A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, NO. 6, pp 983-990, 1990
- [3] J. C. Balda, A. R. Oliva, D. W. McNabb, R. D. Richardson "Measurements of Neutral Currents And Voltages On A Distribution Feeder" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, NO. 4, pp 1799-1804, 1997
- [4] J. Montano, P. Salmeron "Different Approaches For Compensation In Three-Phase Four-Wire Circuits With Active Power Filters" Mediterranean Electrotechnical Conference, Vol. III, 0-7803-6290-X, pp 920-923, 2000
- [5] T. Furuhashi, S. Okuma, Y. Uchikawa "A Study On The Theory of Instantaneous Reactive Power" IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 37, NO. 1, pp 86-90, 1990
- [6] Qun Wang, Weizheng Yao, Jinjun Liu, Zhaoan Wang. "Voltage Type Harmonic Source and Series Active Power Filter Adopting New Control Approach" The 25th Annual Conference of the IEEE, Vol. 2, pp 843-848, 1999.
- [7] Wang Qun, Yao Weizheng, Liu Jinjun, Wang Zhaoan "A Control Approach for Detecting Source Current and Series Active Power Filter" IEEE International Conference on Power Electronics and Drive System, pp910-914, 1999.
- [8] 土屋 秀雄 "系統電流ノルム最小化による無効電力補償に関する研究" 名古屋大學 修士學位論文, 1987.