

순시전압강하 보상기의 새로운 제어 기법

이 상 훈, 최 재 호
충북대학교

A New Control Algorithm for Instantaneous Voltage Sag Corrector

Sanghoon Lee, Jaeho Choi
Chungbuk National University

ABSTRACT

In this paper, a new detection algorithm of faulted voltages under the unbalanced condition and a control algorithm of the instantaneous voltage sag corrector (IVSC) are proposed. To quantify the unbalance under fault conditions, the voltages are decomposed into two balanced three-phase systems using the symmetrical components of positive and negative sequence voltages, which is defined by magnitude factor (MF) and unbalance factor (UF). New control algorithm based on MF and UF values for instantaneous voltage compensation are proposed and verified through the PSCAD/EMTDC simulation and experimental results.

1. 서 론

전력품질(Power Quality ;PQ) 문제는 계통에서 전압, 전류 그리고 주파수의 변동에 기인하는 현상으로 전원의 신뢰도 및 전력설비의 특성을 의미한다. 전력품질 문제로는 순간적인 정전, 전압의 강하와 상승 그리고 고조파 등이 있으며 대부분이 전압의 품질과 관련되어 있다. 이 중 순시전압강하(instantaneous voltage sag)는 그 크기가 공칭전압(nominal voltage)의 0.1 ~ 0.9 [p.u.]이고, 지속시간이 0.5[cycle] ~ 30[cycle]사이의 전압강하를 말하며, 가장 빈번하게 발생하는 전력품질 문제이다.^{[1],[2]}

일반적으로 순시전압강하는 다음과 같은 두 가지 원인으로 인해 발생한다. 첫 번째는 번개에 의한 지락사고와 같은 자연적인 원인에 의해 발생하며, 두 번째는 대용량 모터의 기동과 같은 부하에 의해 발생할 수 있다. 실제적으로 순시전압강하의 대부분은 지락사고에 의해 발생하며, 특히 1선지락사고

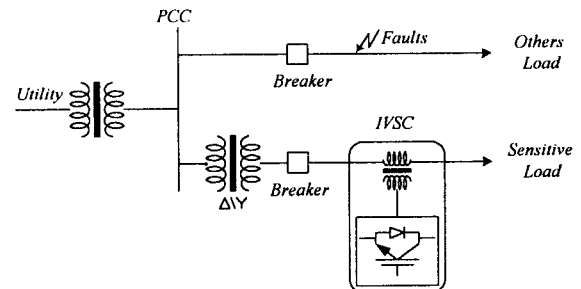


Fig. 1 IVSC system in distribution line

(Single Line-to-Ground Faults ;SLGF)에 의한 순시전압강하가 가장 많다.^[3]

불과 몇 년 전만 하더라도 이러한 순시전압강하는 대부분의 시스템에 큰 영향을 주지 못하였지만 현대의 고도로 발달된 부하의 경우에는 매우 짧은 시간의 순시전압강하도 치명적인 결과를 초래할 수 있다. 예를 들어 전체적인 공정을 제어하는 PLC(Programmable Logic Controller)의 경우 10%의 순시전압강하에도 보호기가 동작하는 사례가 급증하고 있으며, ASD(Adjustable Speed Drive) 시스템의 경우 모터의 속도가 증가 또는 감소하게 되며, 이외에도 반도체 공장의 경우에는 막대한 경제적 손실을 입고 있다.^{[4],[5]} 따라서 일부 선진국에서는 산업체 및 학계에서 순시전압강하 보상에 대한 많은 연구와 개발이 이루어지고 있으며 현장에도 이미 적용되고 있다. 현재 배전계통에서 적용되고 있는 가장 대표적인 장치는 직렬보상과 PWM 인버터를 이용한 IVSC(Instantaneous Voltage Sag Corrector) 시스템이다.^{[6],[7]}

IVSC 시스템의 주된 목적은 그림 1과 같이 인접한 계통에서 지락사고에 의해 순시전압강하가 발생한 경우 순시적인 보상을 통해 민감한 부하를 보호하는 것이다. 따라서 IVSC 시스템이 거의 실시간에 가까운 순시적인 보상을 수행하기 위해서는 이에 적합한 검출 및 제어 알고리즘이 설계되어야 한

다. 그러나 기존의 연구들은 순시전압강하의 주원인인 지락사고를 고려하지 않은 상태에서 시뮬레이션 및 실험을 수행하고 있다. 또한 시스템의 전체적인 성능을 개선시키기 위해서는 검출 및 제어 알고리즘 모두 중요한 요소임에도 불구하고 제어기의 특성 개선에만 초점을 맞추고 있으며 검출 알고리즘에 대한 연구는 매우 미진한 상태이다.

본 논문에서는 IEC(International Electrotechnical Commission)에 규정된 MF(Magnitude Factor)와 UF(Unbalance Factor)를 기반으로 하는 새로운 검출 및 제어 알고리즘을 제안하고 있다. 제안된 알고리즘은 불평형 및 비대칭 조건을 가지는 각각의 지락사고에 대해 동기좌표계로 변환하지 않아도 모든 제어 변수가 시불변 특성을 가질 수 있으며 일반적인 동기좌표계에서의 장점을 가지게 된다. 마지막으로 제안된 알고리즘의 타당성을 증명하기 위해 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션과 prototype의 실험을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 MF와 UF의 검출

서론에서 언급한 바와 같이 대부분의 sag는 지락사고에 의해 발생한다. 이들 지락사고의 대부분이 SLGF이며, 드물게 선간단락사고(Line to line fault), DLGF(Double Line-to-Ground Fault), 그리고 TLGF(Three Line-to-Ground Fault)도 나타난다. 이러한 지락사고 중 TLGF를 제외한 모든 지락사고는 불평형 및 비대칭 특성을 가지게 된다.

IEC에서 규정하고 있는 MF와 UF는 각각 크기와 비대칭에 대한 정도를 표시한 것으로 다음과 같이 정의되어 있다.

$$MF = \frac{v_P}{v_{ref}} = |MF| \angle \phi_{MF} \quad (1a)$$

$$UF = \frac{v_N}{v_P} = |UF| \angle \phi_{UF} \quad (1b)$$

여기서 v_P 는 정상분, v_N 은 역상분을 그리고 v_{ref} 는 사고전의 전압을 의미한다. 먼저 계통이 정상적으로 동작하는 경우 전원 측의 상전압을 다음과 같이 표시한다.

$$v_{s,a} = \frac{V}{\sqrt{3}} \cos(\omega t + \theta) \quad (2a)$$

$$v_{s,b} = \frac{V}{\sqrt{3}} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta) \quad (2b)$$

$$v_{s,c} = \frac{V}{\sqrt{3}} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta) \quad (2c)$$

식 (1)로부터 다음과 같이 선간전압을 계산할 수 있다.

$$v_{s,ab} = V \cos(\omega t + \frac{\pi}{6} + \theta) \quad (3a)$$

$$v_{s,bc} = V \cos(\omega t - \frac{\pi}{2} + \theta) \quad (3b)$$

$$v_{s,ca} = V \cos(\omega t + \frac{5\pi}{6} + \theta) \quad (3c)$$

만약 이 계통에서 'a'상에 1선 지락사고가 발생하면 'a'상의 상전압은 '0'이 되므로 식 (2)의 선간전압은 식 (3)과 같이 변하게 된다.

$$v_{s,ab} = -\frac{V}{\sqrt{3}} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta) \quad (4a)$$

$$v_{s,bc} = V \cos(\omega t - \frac{\pi}{2} + \theta) \quad (4b)$$

$$v_{s,ca} = \frac{V}{\sqrt{3}} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta) \quad (4c)$$

식 (4)에서 알 수 있듯이 SLGF가 발생하면 $v_{s,bc}$ 의 경우 사고전과 동일하지만 나머지 전압의 경우에는 그 크기는 약 58%로 감소하고 위상은 30° 변하게 된다. 식 (4)에서 식 (1)에 정의되어 있는 MF와 UF를 구하기 위해서는 Park's 벡터를 이용하게 되고 영상분을 무시하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} v_{s,abP} \\ v_{s,abN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s,ab} \\ v_{s,bc} \\ v_{s,ca} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(단 여기서 $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 이다.)

정상분과 역상분은 3상 평형 성분이기 때문에 식 (5)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{s,abP} \\ v_{s,bcP} \\ v_{s,caP} \end{bmatrix} = T_P \cdot v_{s,abP} = \frac{2V}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \frac{\pi}{6} + \theta) \\ \cos(\omega t - \frac{\pi}{2} + \theta) \\ \cos(\omega t + \frac{5\pi}{6} + \theta) \end{bmatrix} \quad (6a)$$

$$\begin{bmatrix} v_{s,abN} \\ v_{s,bcN} \\ v_{s,caN} \end{bmatrix} = T_N \cdot v_{s,abN} = \frac{V}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \frac{5\pi}{6} + \theta) \\ \cos(\omega t - \frac{\pi}{2} + \theta) \\ \cos(\omega t + \frac{\pi}{6} + \theta) \end{bmatrix} \quad (6b)$$

(단, $T_P = [1 \ \alpha \ \alpha^2]^T$ 이며 $T_N = [1 \ \alpha^2 \ \alpha]^T$ 이다.)

따라서 식 (3)과 식 (6a)를 비교해 보면 정상분의 경우 크기는 66.7%로 감소하였으며 위상은 모두 동상으로 나타나고 있다. 또한 역상분의 경우에

는 정상분과 상순이 틀리기 때문에 식 (6a)와 비교해 보면 알 수 있듯이 $v_{s, bc}$ 가 동상으로 나타난다. 이와 같이 동상인 경우에는 식 (1)에 정의되어 있는 MF와 UF의 값이 직류량으로 나타나게 되며 이는 동기좌표계로의 변환 없이도 모든 변수들이 시불변(time invariant) 특성을 가지게 됨을 의미한다. 표 1에 각각의 사고에 대한 MF와 UF의 값을 보여주고 있다.

Table 1 MF and UF under faults conditions

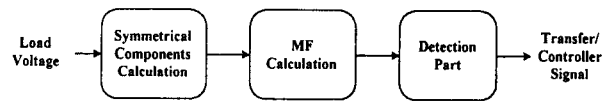
	SLGF	Line-to line faults	DLGF	TLGF
MF	0.667	0.5	0.333	0
UF	0.5	-1	-1	0

2.2 검출 알고리즘

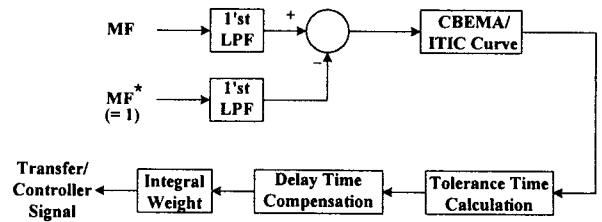
IVSC 시스템에 있어서 검출 알고리즘은 단순한 검출뿐만 아니라 전원의 이상여부를 판단하고 이를 통해 절환 스위치 및 제어기의 보상 시간을 결정하게 되므로 검출 알고리즘이 시스템의 전체적인 성능을 결정한다고 해도 과언은 아니다. 이러한 검출 알고리즘은 빠른 검출 시간과 잡음 및 전원의 과도 상태에 강인한 특성을 가져야 한다.

현재 이에 대한 연구를 살펴보면 크게 다음과 같은 3가지를 들 수 있다. 첫 번째가 평균치 방법이다. 이 방법은 정확하고 잡음 및 전원의 과도 현상에는 강인한 특성을 가지지만 평균치를 얻기 위해 정확한 영점(zero crossing) 검출이 필요하며, 검출 시간이 최소 반주기 이상이기 때문에 순시전압강하 검출 기법으로는 부적절하다. 두 번째는 순시적인 교류량으로부터 상대오차를 이용하는 방법으로 간단한 필터의 사용으로 위에서 언급된 두 가지 조건은 만족시킬 수 있지만 불평형 및 비대칭 조건에서는 각상에 대하여 검출회로를 모두 구현해야 하며, 이로 인해 제어 알고리즘 역시 독립제어를 수행하게 된다. 따라서 모든 제어 변수가 시변(time variant) 특성을 지니게 되므로 제어기 설계가 어렵고 정상상태 오차가 존재하는 등 여러 가지 문제점을 가지게 된다. 마지막으로 이러한 단점을 극복하기 위해 동기좌표계에서의 순시적인 검출 방법이 제안되었다.^[8] 그러나 이 방법 역시 불평형 및 비대칭 조건에서는 여전히 교류량으로 나타나게 되므로 사고 시작 위치에 따라 검출 시간이 변하게 되고 제어 변수 역시 시변 특성을 가지게 된다. 이를 직류량으로 표현하기 위해서는 별도의 위상검출 회로나 PLL 회로가 필요하다.

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 MF와 UF를 기반으로 하는 새로운 검출 알고리즘을 제안한다. 제안된 검출 알고리즘의 블록도가 그



(a) Overall block diagram



(b) Detection part in fig. 2(a)

Fig. 2 The proposed detection algorithm

림 2에 보이고 있다. 제안된 검출 알고리즘은 참고 문헌 [8]과 입력부분을 제외하고 모두 동일하므로 이에 대한 설명은 생략한다.

2.3 제어 알고리즘

본 논문에서는 제안된 검출 알고리즘에 기반을 둔 새로운 제어 알고리즘을 제안한다. 그림 4와 그림 5에 본 논문에서 사용된 IVSC 시스템의 회로도 와 제안된 제어 알고리즘의 블록도가 보여지고 있다.

MF와 UF에서의 첨자 S, L 그리고 C는 각각 전 원전압, 부하전압 그리고 보상전압을 의미한다. 따라서 IP 제어기를 이용하여 보상전압의 MF와 UF를 제어하고 있으며 결국 인버터 출력 커패시터 전압에 대한 순시적인 제어를 기본 구조로 하고 있다. 본 논문에서는 사용되지 않고 있지만 제어기의 동특성을 향상시키기 위해 내부루프로 인덕터의 전류제어를 추가할 수 있다. 부궤환 제어에서 가장 중요한 부분은 지령치를 결정하는 것으로 그림 4와 5로부터 다음과 같은 단계를 통해 계산할 수 있다. 먼저 인버터 출력전압의 지령치는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[v_{c, abc}^*] = \frac{1}{K_T} \cdot \{ [v_{l, abc}^*] - [v_{s, abc}] \} \quad (7)$$

단, 여기서 $[v_{abc}] = [v_{ca} \ v_{cb} \ v_{cc}]^T$ 이며, K_T 는 직렬변압기(T_S)의 권선비이다.

불평형 및 비대칭 조건에서의 제어를 수행하기 위해서는 식 (5)와 식(6)을 이용하여 식 (7)로부터 정상분과 역상분을 구해야 하며, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[v_{c, abc}^*]_P = \frac{T_P}{K_T} \cdot (v_{la, P}^* - v_{sa, P}) \quad (8a)$$

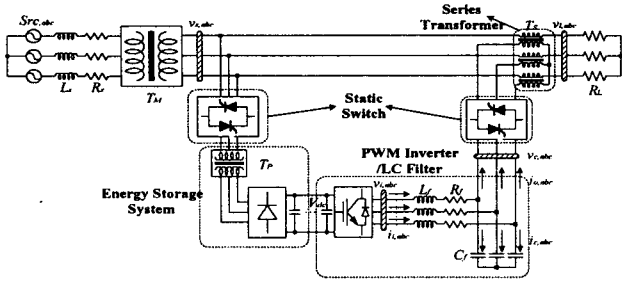


Fig. 4 IVSC system used in this paper

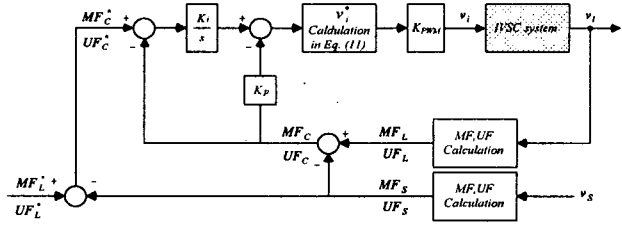


Fig. 5 The proposed control algorithm

$$[v_{c,abc}^*]_N = \frac{T_N}{K_T} \cdot (v_{la,N}^* - v_{sa,N}) \quad (8b)$$

따라서 불평형 및 비대칭 특성을 가지는 사고 전압을 보상한다는 의미는 식 (8)에서 부하전압의 정상분은 지령치와 같게 만들고 역상분은 '0'이 되도록 하는 것이다. 따라서 지령치(v_{ref})를 이용하면 식 (8)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[v_{c,abc}^*]_P = \frac{T_P}{K_T} \cdot (1 - \frac{v_{sa,P}}{v_{ref}}) \cdot v_{ref} \quad (9a)$$

$$[v_{c,abc}^*]_N = -\frac{T_N}{K_T} \cdot \frac{v_{sa,N}}{v_{ref}} \cdot v_{ref} \quad (9b)$$

식 (1)을 이용하면 식 (9)는 다음과 같이 변환된다.

$$[v_{c,abc}^*]_P = \frac{T_P}{K_T} \cdot (1 - MF_S) \cdot v_{ref} \quad (10a)$$

$$[v_{c,abc}^*]_N = -\frac{T_N}{K_T} \cdot MF_S \cdot UF_S \cdot v_{ref} \quad (10b)$$

따라서 인버터 출력전압의 지령치는 R_f 에서의 전압강하를 무시하면 식 (10)으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[v_{i,abc}^*] = K_{PWM} \cdot \{ [v_{c,abc}^*]_P + [v_{c,abc}^*]_N \} \quad (11)$$

3. 시뮬레이션 및 실험

표 2와 표 3에 규정되어 있는 변수들을 사용하여 시뮬레이션 및 prototype의 실험을 수행하였다. 스위칭소자는 IGBT를 사용하였으며 TMS320C31 DSP에 의해 전 디지털로 구현되었다. 불평형·비대칭 전원을 만들어 주기 위해 “ELGA SW 5250A AC Power Supply”를 사용하였다. 이 장치의 제한으로 약 1 [KVA] 용량으로 실험을 수행하였다.

Table 2 Simulation parameters

parameter	value	parameter	value
정격용량	10 [KVA]	스위칭 주파수	5 [kHz]
정격전압	311 [V _{peak}]	사고 지속기간	60 [msec]
정격전류	37.1 [A _{peak}]	DC Link 전압	514 [V]
임피던스	8.4 [Ω]	LPF 차단주파수	100 [Hz]

Table 3 Experimental parameters

parameter	value	parameter	value
정격용량	1 [KVA]	스위칭 주파수	5 [kHz]
정격전압	200 [V _{peak}]	사고 지속기간	60 [msec]
정격전류	2.88 [A _{peak}]	LPF 차단주파수	100 [Hz]

그림 6에서 (a)의 경우 위로부터 순서대로 주 변압기의 1차 측 전압, 주 변압기의 2차 측 전압, 보상전압, 부하전압, 그리고 DC 전압을 보여주고 있다. 또한 (b)의 경우에는 주 변압기의 2차 측 전압과 부하전압의 MF와 UF를 보여주고 있다. 시뮬레이션에서 에너지 저장 장치로 사용된 커패시터 뱅크의 용량은 참고문헌 [9]에서 설계된 방법을 사용하였다. 실험 결과인 그림 7은 위로부터 순서대로 전원전압, 보상전압, 부하전압, 전원전압의 MF, 전원전압의 UF, 부하전압의 MF, 부하전압의 UF를 보여주고 있다.

그림 6과 그림 7에서 SLGF가 발생한 경우 주 변압기 2차 측 전압의 MF는 0.667이 되며, UF는 0.5가 되고 있음을 알 수 있고, 보상 장치의 동작으로 부하전압의 MF와 UF는 각각 1과 0으로 유지되고 있다.

이상의 시뮬레이션 및 실험 결과들로부터 각각의 사고에 대해 MF와 UF가 항상 직류량으로 나타나고 있음을 알 수 있으며, 제안된 검출 및 제어 알고리즘이 매우 우수한 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

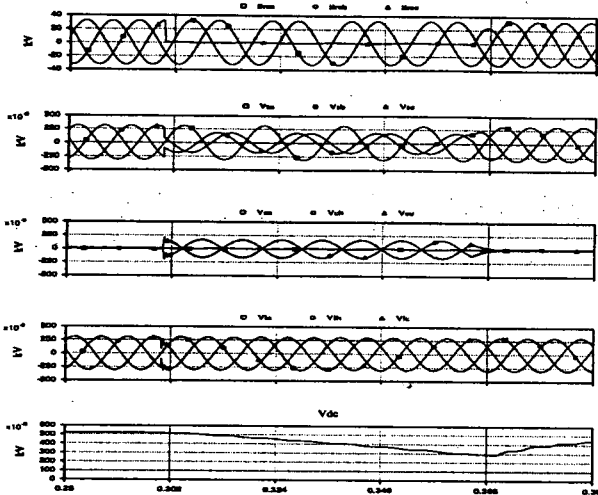
4. 결 론

본 논문에서는 배전계통에서 적용되는 순시전압강하 보상 장치에 대한 새로운 검출 및 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 검출 및 제어 알고리즘은 MF와 UF를 기반으로 설계함으로써 불평형 및 비대칭 조건을 가지는 지락사고에서도 모든 제어 변수가 시불변 특성을 가지게 되었고 그 구조가 기존의 동기좌표계에서의 제어 알고리즘에 비해 매우 간단하다는 장점을 가진다.

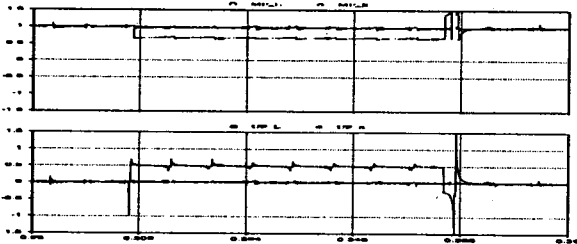
마지막으로 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] Mark F. McGranaghan et al., *Electrical Power System Quality*, McGraw-Hill, 1996.
- [2] Math H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems*, IEEE Press, 1999.
- [3] Douglas S. Dorr et al., "Interpreting Recent Power Quality Surveys to Define the Electrical Environment," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 33, No. 6, pp. 1480~1487, November/December, 1997.
- [4] Mark F. McGranaghan et al., "Voltage Sags in Industrial Systems", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 29, No. 2, pp. 397~403, March/April, 1993.
- [5] J.C. Das, "Effects of Momentary Voltage Dips on the Operation of Induction and Synchronous Motors," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 26, No. 4, pp. 711~718, July/August, 1990.
- [6] M. F. Granaghan, "Dynamic Sag Corrector : Cost Effective Industrial Power Line Conditioning", *IEEE IAS*, pp. 1339~1344, 1999.
- [7] G. Joos, "Three-Phase Static Series Voltage Regulator Control Algorithms for Dynamic Sag Compensation", *IEEE ISIE*, pp. 515~520, 1999.
- [8] S. Lee et al., "A Voltage Disturbance Detection Method for Computer Application Loads", *Trans on KIPE*, Vol. 2, No. 6, pp. 584~591, January, 2000.
- [9] S. Lee et al., "Power Quality Enhancement in Distribution Line using Series Compensator," *IEEE POWERCON '2000*, pp. 1595~1600, 2000.

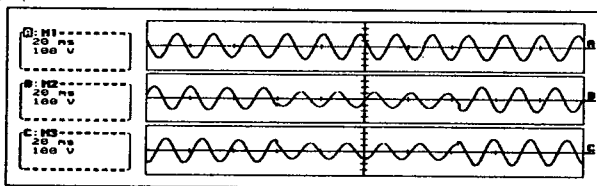


(a) Voltages

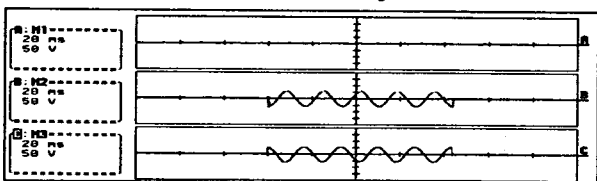


(b) MF and UF of source and load voltage

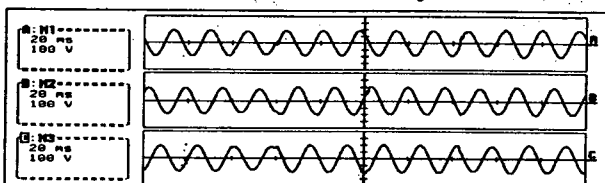
Fig. 6 Simulation results under SLGF condition



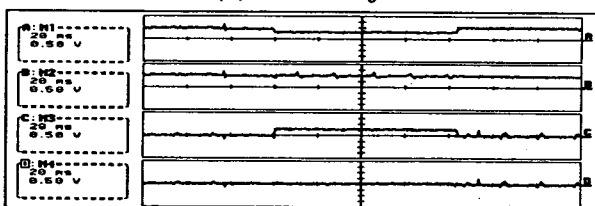
(a) Source voltage



(b) Compensation voltage



(c) Load voltage



(d) MF and UF of source and load voltage

Fig. 7 Experimental results under SLGF condition