

다중 부하중심점에 기반한 온라인 퍼지 ULTC 제어기 설계에 대한 연구

論 文

55A-12-2

A Study on the On-Line Fuzzy ULTC Controller Design Based on Multiple Load Center Points

高 銳 錫[†]
(Yun-Seok Ko)

Abstract - The existing ULTC operation control strategy based on the measured data deteriorates the voltage compensation capability making the efficient corresponding to the load variation difficult by following the fixed load center point voltage. Accordingly, this paper proposes a new on-line fuzzy ULTC controller based on the designed multiple load center points which can improve the voltage compensation capability of ULTC and minimize voltage deviation by moving in real-time the load center point according to the load variation to an adequate position among the multiple load center points designed using the clustering technique. The Max-Min distance technique is adopted as the clustering technique for the decision of multiple load points from measured MTr load current and PTr voltage, and the minimum distance classifier is adopted for the decision of fuzzy output membership function. To verify the effectiveness of the proposed strategy, Visual C++ MFC-based simulation environments is developed. Finally, the superiority the proposed strategy is proved by comparing the fuzzy ULTC operation control results based on multiple load center points with the existing ULTC operation control results based on fixed load center point using the data for three day.

Key Words : Main Transformer, Fuzzy ULTC Controller, Multiple Load Center Point, On-Line Voltage Management

1. 서 론

전력회사에서는 일반 수용가에 고품질의 전기를 공급하기 위해 정전관리, 손실관리, 전압관리, 부하관리 등의 업무를 수행한다. 전압관리 측면에서는 특정한 시기에 주변압기 직하, 전압강하 5% 및 10%지점의 변대직하 및 말단의 수용가를 전압 측정개소로 선정하여 3일간 30분 주기로 전압을 측정, 전압 적정율을 조사, 보고한다. 그리고 그 결과에 따라 전압강하 개선 공사를 실시하며 측정된 데이터를 기반으로 주변압기에 장착된 ULTC의 부하중심점을 결정, ULTC의 Ur, Ux를 조정, ULTC로 하여금 주변압기 부하전류에 따라 전압 강하 분을 실시간으로 보상하여 부하중심점의 전압을 일정하게 유지하도록 함으로써 수용가에 공급되는 전압을 허용범위내(220±13[V])에서 유지할 수 있도록 노력한다.

그러나 작업자가 사업소별로 관할 배전선로 상의 수백개소에 전압기록계기를 설치하고 3일 동안 전압을 기록, 수거해야 하는데, 장거리 선로의 경우 수십 Km에 이르고 도심지의 경우 교통체증, 수용가의 외출 등으로 엄청난 시간비용과 노력을 요구하며 동시에 정확성을 보장하기가 어렵다. 전력회사에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위해 노력하여 왔으며 그 일환으로 아날로그 측정계기를 디지털화하여 분석작업의 효율성을 기할 수 있었다[1-3]. 그러나 기술적, 경

제적 어려움 등으로 측정업무 자체의 비효율성을 개선할 수 있는 솔루션을 도입하지 못하였으며, 이로 인해 최근 전압관리 담당자들로 하여금 전압관리 업무의 효율성과 정확성을 획기적으로 개선할 수 있는 온라인 전압관리에 대한 요구에 직면하고 있다. 특히 기존의 실측 데이터를 기반으로 하는 고정 부하 중심점 기반의 ULTC 제어기가 고정된 부하중심점의 전압을 추종함으로써 계절별로 부하변화를 효과적으로 고려하지 못해, 전압보상능력을 크게 저하시키고 있다. 이러한 환경하에서 최근 급속한 발전을 이루고 있는 센서기술, 정보통신 기술, 인공지능 기술과 국내의 선도적 통신 인프라를 기반으로 유비쿼터스 환경하에서 수용가의 측정개소로부터 온라인으로 데이터를 취득하여 수용가 전압측정관리업무의 정확성과 효율성을 제고할 수 있는 온라인 전압관리 솔루션 개발에 대한 연구가 새롭게 시도되고 있다[4-5]. 그러나 이들 연구에서는 고정 부하 중심점에 기반 한 ULTC 운전전략이 고려됨으로써 시스템 운전자의 요구에 부응하고 동시에 최근의 디지털 프로그래밍 기법을 활용하여 전압보상능력을 개선시킬 수 있는 효율적인 ULTC 운전제어 전략이 새롭게 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 클러스터링 기법을 도입하여 실측 데이터로부터 다중부하중심점(MLTC : Multiple Load Center Points)을 설계하고 부하패턴의 변화에 따라 실시간으로 부하중심점을 적절한 위치로 이동시킴으로써 부하변화를 효율적으로 추적, 배전 변전소 주변압기 ULTC의 전압보상능력을 개선하고 전압편차를 최소화할 수 있도록 하는 MLTC 기반 온라인 퍼지 ULTC 제어기를 새롭게 제안한다. 퍼지 제어기는 기존방법에 비해연속 입력패턴에 대한 퍼지

[†] 교신저자, 正會員 : 남서울大學 電子情報通信工學部
副教授·工博

Email : ysko@nsu.ac.kr

接受日字 : 2006年 7月 26日

最終完了 : 2006年 11月 1日

적 선형/비선형 보간(interpolation) 추론을 위해 채택된다. 그리고 부하 중심점 군집화를 위한 클러스터링 기법으로는 최대, 최소거리 기법이 채택되며, 퍼지 출력 멤버십 함수 결정을 위해서는 최소거리 분류기가 채택된다. 그리고 제한된 전략의 유효성을 검증하기 위해 비주얼 C++의 MFC를 기반으로 하는 시뮬레이션 환경이 개발된다.

2. 기존 전압관리 및 ULTC 운전제어 전략

2.1 전압관리 데이터 실측 환경

일반적으로 전압관리를 위해 실측조사가 1년에 2번 여름철(7-8월경) 및 가을철에 실시되는데, 그림 1에 보인바와 같이 주변압기 송출지점, 5% 전압강하 지점 및 말단지점에 해당하는 배전변압기 직하와 말단 등을 측정개소로 선정하고 전압관리 기록계기를 직하 및 말단 수용가내에 설치한다 [1-5].

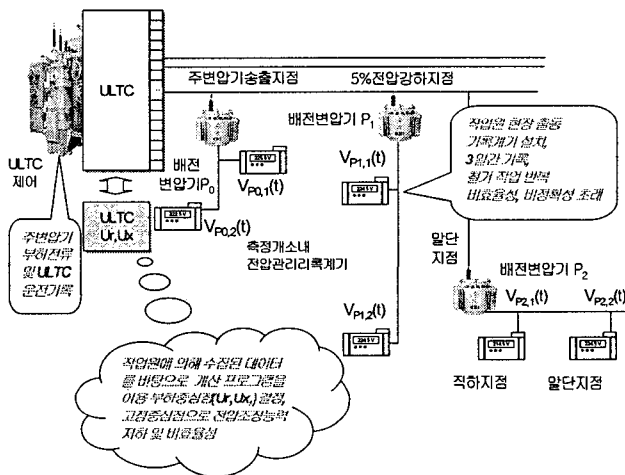


그림 1 전압관리 측정개소 및 구성
Fig. 1 Voltage management measuring point and configuration

다음, 3-4일동안 30분주기로 주변압기 부하전류 및 전압 평균치를 기록하고 기록이 완료되면 작업자는 전압관리 기록계기를 철거하여 전압 분석 시스템을 이용, 주어진 기간동안 기록된 전압을 검토하여 전압이 220±13V 즉, 상한전압 233V나 하한전압 207V의 한계치를 초과하는 부적정 측정개소를 확인, 전압적정유지율을 계산하게 된다. 그리고 이 실측 데이터를 바탕으로 부적정 개소에 대해 변압기 탭 변경 및 ULTC 부하중심점 정정 그리고 전압보강공사를 실시하여 전압 적정율 개선을 시도한다. 먼저, 부적정 개소들에 대한 주상변압기 PTr 탭을 적정위치로 변경한 후, 주변압기 MTr 고정탭을 최적위치로 설정, 최적탭하에서 PTr 전압을 얻는다. 그리고 PTr 전압과 MTr 부하전류를 기반으로 ULTC 정정치를 최적하게 설정한다. 이때 주상변압기 및 주변압기 고정 탭 결정과정은 참고문헌[4-5]에서 보인다.

2.2 고정 부하중심점 기반 ULTC 운전제어 전략

현재, ULTC 운전제어전략으로 채택되고 있는 전압강하 보상법은 전체 시간대에 가장 적절한 하나의 고정된 부하

중심점과 그 위치에서의 유지전압을 결정한 다음 ULTC가 그 값들을 기준으로 ±10%(17탭)의 전압보상능력 이용하여 시간대별로 부하전류의 변화에 따라 변화하는 부하 중심점까지의 전압강하분을 보상케하여, 부하중심점의 전압이 일정하게 유지되도록 하는 방법이다. LDC(Line Drop Compensation) 정정치는 전압강하 해석법과 실측 데이터 이용법 의해서 결정될 수 있는데, 후자의 경우 그림 1에 보인바와 같이 실측된 VP0,1(t), VP2,2(t) 그리고 주변압기 부하전류 I(t)를 이용하여 정정치를 결정함으로써 VP0,1(t)를 허용전압의 상한치보다 낮게 그리고 VP2,2(t)를 허용전압의 하한치보다 높게 유지되도록 하는 방법이다. 여기서, VP0,1(t)는 주변압기 직하지역의 주상변압기에 대한 2차측 직하 수용가 전압을 원칙으로 하나 실측의 편의상 주변압기 PT의 송출전압으로 하기 때문에, VM,1(t)로 한다. VP2,2(t)는 일반적으로 선로 말단부 PTr 2차측 말단 수용가 공급전압을 표시한다.

실측 데이터들로부터 최적의 고정 ULTC 정정치를 얻는 방법은 먼저 그림 1에서 가장 심각한 부하조건인 배전선로를 선택한 다음, 주어진 기간 동안의 전압 실측 데이터 VM,1(k), VP2,2(k) 그리고 주변압기 부하전류 실측 데이터 I(k)를 얻는다. 다음 VM,1(k), VP2,2(k)를 기반으로 측정시간대에 대해서 허용전압의 상한치와 허용전압의 하한치에 대한 편차를 최소로 하는 주변압기의 최적 송출전압 Vopt(k)를 얻는다. 그리고 I(k)의 변화에 따른 Vopt(k)와의 편차를 표시하는 식 (1)을 최소화하는 부하 중심점의 임피던스 Z와 그 부하 중심점에서 유지전압 Vo를 구하면 된다.

$$Q = \sum_{k=1}^n [V_{opt}(k) - (V_o + Z \cdot I(k))]^2 \quad (1)$$

즉 $\partial Q / \partial Z = 0$, $\partial Q / \partial V_o = 0$ 를 만족하는 Z와 Vo를 구하면 되는데, 각각 식 (2)와 식(3)과 같이 얻어진다. 그리고 Z로부터 ULTC 정정치 Ur, Ux를 구한다.

$$Z = \frac{\sum_{k=1}^n V_{opt}(k) \sum_{k=1}^n I(k) - n \sum_{k=1}^n I(k) V_{opt}(k)}{(\sum_{k=1}^n I(k))^2 - n \sum_{k=1}^n (I(k))^2} \quad (2)$$

$$V_o = \frac{\sum_{k=1}^n V_{opt}(k) \sum_{k=1}^n I(k) - Z \sum_{k=1}^n (I(k))^2}{\sum_{k=1}^n I(k)} \quad (3)$$

식 (1-3)에서 n은 데이터 수를 표시하며 보다 자세한 식의 유도과정은 참고문헌 [2,3,5]에서 설명된다. 그러나 이 방법은 기존 전압관리 방식에 근거 작업원에 의해 수집된 데이터를 바탕으로 계산 프로그램을 이용하여 부하중심점을 결정, 하나의 고정된 부하중심점으로 운영하기 때문에 계절별 부하변화에 따라 ULTC의 전압보상 능력의 저하를 가져올 수 있다.

2.3 다중 부하 중심점 기반 온라인 ULTC 운전제어 전략

온라인 ULTC 운전제어 전략의 기본 개념은 온라인 전압관리 시스템이 주기적으로 데이터를 측정, ULTC의 부하중

심점을 새롭게 설정한 후 특히, 부하 중심점을 대표적인 부하 레벨에 따라 다중의 부하 중심점으로 설계한 후, 그 정보를 실시간 ULTC 제어기에 전송, ULTC 제어기가 온라인으로 계측되는 부하에 따라 부하 중심점을 다중의 부하 중심점 중에서 적절한 위치로 이동시키면 ULTC의 전압보상 능력크게 개선시킬 수 있다는 새로운 개념이다.

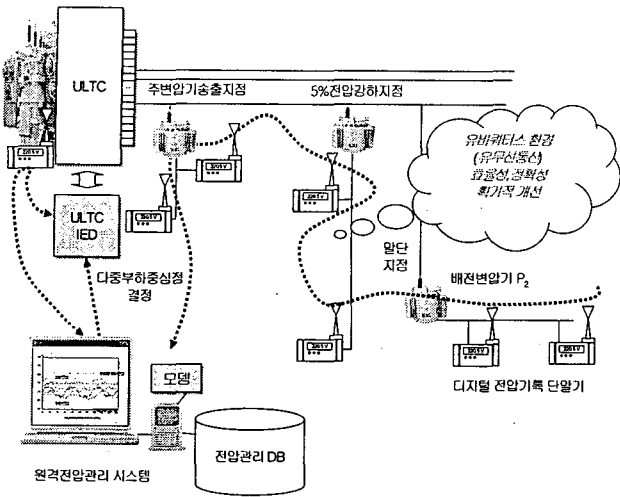


그림 2 온라인 ULTC 운전제어 전략
Fig. 2 The on-line ULTC operation and control strategy

그림 2는 새롭게 제안되는 다중 부하 중심점에 기반한 온라인 ULTC 제어기의 구성도를 보인다. 그림에서 전압관리 시스템은 유비쿼터스 환경하에서 주기적으로 수집되는 전압관리 데이터로부터 다중부하중심점을 설계하여 ULTC IED(Intelligent Electric Device)에 제공하고, ULTC 제어기는 부하에 따라 부하중심점을 그 다중부하 중심점 중의 적절한 위치로 이동, 전압보상능력을 개선시키게 된다.

3. 온라인 퍼지 ULTC 운전제어전략 설계

본 장에서는 온라인 전압관리 시스템하에서 다중 부하 중심점에 기반한 실시간 퍼지 ULTC 운전 제어 전략을 설계한다. 기본적으로 전압관리 프로세스는 일정 주기에 따라 PTR의 저압 수용가 전압관리 장치(CVMD)로부터 전압정보를 계측하며 동시에 동일시간대에 주 변압기 IED로부터 주변압기 부하전류 I(t) 및 ULTC 운전이력 정보를 제공 받는다. 그림 3은 다중 부하 중심점 기반 온라인 퍼지 ULTC 운전제어 전략을 보인다. 먼저, 전압관리 프로세스는뱅크별 계측된 데이터들을 최대, 최소거리 클러스터링 기법을 적용하여 다중개의 대표적인 클러스터들로 분류하고, 각 클러스터에 속하는 실측 데이터에 대해, 기존 실측 데이터 기반 부하 중심점 결정 기법을 적용하여 각각의 부하 중심점(V_o, Z)를 결정한다. 다음 각 클러스터의 중심점을 기반으로 퍼지 입력 값을 정하고 퍼지 입력 멤버십 함수를 결정한다. 끝으로, 각 입력 조합에 대해 패턴 인식 기법을 적용하여 퍼지 출력 멤버십 함수를 결정한다. 그리고 이때 결정된 클러스터별 부하 중심점 정보, 퍼지 입출력 멤버십 함수 값을 주변압기 IED에 온라인으로 제공한다. 이때, 주변압기 IED는 온라

인으로 제공된 다중 부하 중심점 데이터들을 새로운 부하 데이터로 업데이트 한 다음, 온라인으로 제공되는 MTr 부하전류 및 PTR 전압 데이터를 입력으로 하여 퍼지추론을 실행, 다중 부하 중심점 중에서 적절한 부하 중심점을 출력으로 추론, 새로운 부하중심점으로 설정하고, 이를 기반으로 MTr 부하전류에 따라 실시간으로 전압강하 분을 계산, 적절한 ULTC 탭을 결정하여 송출전압이 최적 송출전압을 추종하도록 제어한다.

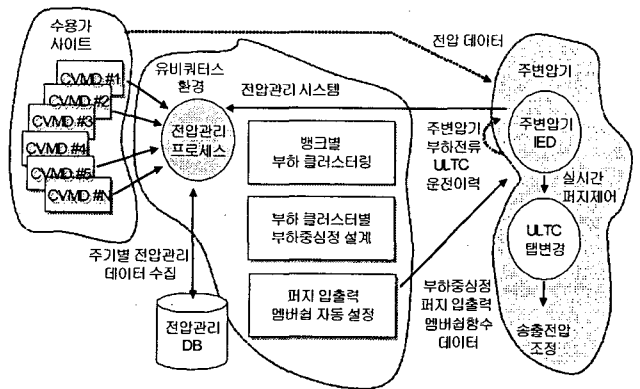


그림 3 다중부하중심점 기반 온라인 퍼지 ULTC 제어전략
Fig. 3 On-line fuzzy ULTC control strategy based on the multiple load center points

3.1 클러스터링 기반 다중 부하 중심점 설계

클러스터링에 기반한 다중 부하중심점 설계는 제공되는 모든 부하패턴들을 클러스터링 기법을 적용하여 다중개의 클러스터들로 군집한 다음, 각 클러스터들에 대해 고정 부하 중심점 결정 방식을 반복함으로써 다중 부하 중심점을 설계한다.

3.1.1 클러스터링 기법에 기반한 부하패턴 군집화

클러스터링 기법은 다량의 패턴들 중 유사성을 가지는 패턴들만을 하나의 집단으로 분류하는 기법으로써 최대최소거리 알고리즘은 클러스터링 과정이 임계값(T) 값에 심각하게 영향을 받는 임계값 알고리즘에 비해 유클리디언 거리 개념의 최대최소 거리를 이용하며, 클러스터간의 평균거리를 기반으로 클러스터를 합리적이고 자율적으로 확장시켜 나갈 수 있는 장점을 가진다[6]. 본 연구에서 패턴은 현재의 부하 레벨을 구분하는데 유용한 $p_i = \{V_{M,1}(i), VP_{2,2}(i)\}$ 로 구성된다.

먼저, 임의적으로 부하패턴 중 하나의 패턴 p_i 를 선택하여 초기집단 중심점 z_1 으로 정한다. 다음, 패턴 p_i 로부터 가장 먼 패턴을 z_2 로 선택한 후, 최소거리 분류기를 이용하여 나머지 패턴들에 대해서 식 (4)로 표시되는 거리를 계산하여 두 군집 중 어느 군집에 속하는 지를 결정한다. 식 (4)에서 z_{mi} , p_{mi} 는 각각 i번째 클러스터 센터와 t번째 전압패턴의 m번째 요소를 표시한다.

$$D_i = [w_1(z_{1i} - p_{1t})^2 + w_2(z_{2i} - p_{2t})^2 + \dots + w_n(z_{ni} - p_{nt})^2]^{1/2} \quad (4)$$

식 (4)에서 w_i 는 i번째 가중함수로서 요소의 중요도에 따라 결정되는데 여기서는 동일하게 1로 설정한다. 그리고 클

러스터가 20개 이내에서 충분하기 때문에 새로운 클러스터의 추가에 따른 계산과정은 큰 계산비용이 요구되지 않을 것으로 판단된다. 다음, 클러스터의 중심점들 z_i 를 구하게 되는데 이때, i 번째 군집의 군집 중심점(cluster center)은 군집 내의 패턴이 N 개, 패턴의 요소수가 m 이라면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$z_i = \frac{1}{N} \left[\sum_{j=1}^N p_{1j} \quad \sum_{j=1}^N p_{2j} \quad \dots \quad \sum_{j=1}^N p_{mj} \right] \quad (5)$$

다음에 각 군집들에 대해 소속패턴들 중 클러스터 중심점으로부터 가장 먼 패턴의 클러스터 중심점까지의 거리를 클러스터 중심점들 사이의 평균거리와 비교한다. i, k 번째 군집 중심점들 사이의 평균거리는 식 (6)으로 표시한다.

$$AvrD = \frac{1}{2} [(z_{1i} - z_{1k})^2 + (z_{2i} - z_{2k})^2 + \dots + (z_{mi} - z_{mk})^2]^{1/2} \quad (6)$$

만약, 최대거리가 이 평균거리보다 크면 이 패턴은 새로운 클러스터 중심점이 된다. 이 클러스터링 과정은 모든 클러스터들에 대해서 실시되며, 임의의 새로운 클러스터 중심점들이 나타나지 않을 때까지 반복된다. 만약 이 과정에서 q 개의 클러스터들(C_1, C_2, \dots, C_q)가 존재한다면 q 개의 부하중심점(z_1, \dots, z_q)가 존재하며, 동시에 모든 부하패턴들은 q 개의 클러스터들로 분류된다.

3.1.2 클러스터별 부하중심점 설계 방법

모든 부하패턴들을 각 클러스터들 별로 분류한 다음, 각 클러스터들에 대해 고정 부하 중심점 기반 ULTC 운전제어 전략에서 설명된 식 (2-3)으로 표시되는 실측 데이터 기반 고정 부하 중심점 결정 방식을 반복 적용함으로써 각 클러스터별 부하 중심점(V_{oq}, Z_q)를 결정한다.

3.2 퍼지 제어기 설계

3.2.1 입출력 멤버십 함수 설계

입력 멤버십 함수들은 {XXLN, XLN, LN, MN, SN, VS, SP, MP, LP, XP, XXP} 중에서 VS를 기준으로 하여 5, 7, 9, 11개의 멤버십 함수가 설계자의 요구에 따라 선택적으로 설계되도록 하였다. 표 1은 9개의 입력에 대해 7개의 멤버십 함수를 선택했을 때 입력 멤버십 함수의 예를 보인다[8-9].

표 1 입력 멤버십 함수 설계

Table 1 Input membership function design

표준화된 입력	입력 멤버십 함수(IM)						
	LN	MN	SN	VS	SP	MP	LP
η_{11}	1	0.7	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0
η_{21}	1	0.9	0.7	0.5	0.2	0.0	0.0
η_{31}	0.8	1	0.9	0.7	0.4	0.2	0.0
η_{41}	0.6	0.8	1	0.9	0.6	0.4	0.2
η_{51}	0.4	0.6	0.8	1	0.8	0.6	0.4
η_{61}	0.2	0.4	0.6	0.9	1	0.8	0.6
η_{71}	0.0	0.2	0.4	0.7	0.9	1	0.8
η_{81}	0.0	0.0	0.2	0.5	0.7	0.9	1
η_{91}	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.7	1

표 1에서 η_{ij} 는 j 번째 입력변수의 i 번째 입력으로써 입력 변수들 $V_{M,1}(i), V_{P2,2}(i)$ 에 대한 표준화된 입력을 표시한다. 이들 멤버십 함수 값들은 기본 설정 값이며 퍼지 리레이션 관계를 통해 최적한 결과가 얻어지도록 실험적으로 반복, 교정된다.

출력 멤버십 함수들은 {IN, EEN, EN, XXLN, XLN, LN, MN, SN, VS, SP, MP, LP, XP, XXP, EP, EEP, IP} 중에서 VS를 기준으로 하여 5, 7, 9, 11, 15, 17개의 멤버십 함수가 설계자의 요구에 따라 설계되도록 한다. 여기에서는 클러스터링 기반 다중 부하 중심점 설계 방식에 근거하여 설계된 클러스터들의 수가 출력들 멤버십 함수의 수가 되도록 하였는데 9개를 선택한 경우의 예를 보인다. 만약 2개의 입력변수를 선택하는 경우 퍼지규칙의 조건부는 $\nu_1(IM_{p1}, IM_{q2})$ 으로 표시된다. 여기서 IM_{ij} 는 j 번째 입력의 i 번째 입력 멤버십 함수를 표시한다. 일반적으로 퍼지 조건부와 퍼지 리레이션 관계는 실험적 경험에 기반한 퍼지규칙을 활용하여 표 2와 같이 구하는데[8,10], 여기에서는 입출력 멤버십 함수 수가 비대칭이고 또한 출력 멤버십 함수 수도 20개 이내에서 설계되기 때문에 일반적인 퍼지규칙을 참조, 적용하기 어렵다.

표 2 퍼지 관계 행렬 설계

Table 2 Fuzzy reallion matrix design

ULTC 제어기 입력	ULTC 제어기 출력								
	XN	LN	MN	SN	VS	SP	MP	LP	XP
	출력 멤버십 함수(OM)								
	$\mu_R(\nu_i, XN)$	$\mu_R(\nu_i, LN)$	$\mu_R(\nu_i, MN)$	$\mu_R(\nu_i, SN)$	$\mu_R(\nu_i, VN)$	$\mu_R(\nu_i, SP)$	$\mu_R(\nu_i, MP)$	$\mu_R(\nu_i, LP)$	$\mu_R(\nu_i, XP)$
$\nu_1(LP, LN)$	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0
$\nu_2(LP, MN)$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0
$\nu_3(LP, SN)$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0
$\nu_4(LP, VS)$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5
$\nu_5(LP, SP)$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0
$\nu_6(LP, MP)$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0
$\nu_7(LP, LP)$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0

따라서, 앞에서 결정된 표준화된 입력값들의 조합으로부터 얻어지는 각 퍼지 조건부 ν_i 에 대해 최소거리 판별법을 적용하여 가장 유사한 클러스터를 결정, 그 클러스터에 해당하는 부하중심점과의 관계를 이용해 실험적으로 퍼지 리레이션 행렬을 결정한다. 여기에서 $\nu_1(LP, LP)$ 는 ULTC 제어기 입력 η_{p1}, η_{q2} 에 ν_i 에 대한 멤버십 함수가 LP, LN인 경우를 표시하며, $\mu_R(\nu_i, OM_j)$ 은 퍼지입력 조건부 ν_i 에 대해 최소거리 분류기에 근거하여 결정되는 j 번째 출력 멤버십 함수에 대한 퍼지 리레이션을 표시한다. 표 2는 49개의 입력들 중에서 7개의 경우를 보인다. OM_j 는 j 번째 출력 멤버십 함수를 표시한다. 최소거리 판별법은 실시간 입력 패턴과 가장 유사한 클러스터를 얻기 위해 채택되는데, 이 방법에서 유사성의 정도는 식 (7)로 표시되는 유클리디언 거리 D_i 에 의해서 판별되며 가장 유사한 클러스터는 $\min(D_i)$ 를 가지는 클러스터가 된다.

$$D_i = [w_1(r_{1p} - z_{1i})^2 + w_2(r_{2p} - z_{2i})^2 + \dots + w_n(r_{mp} - z_{mi})^2]^{1/2} \quad (7)$$

식 (7)에서, z_{mi} 는 클러스터링 기반 다중 부하 중심점 설

계 방식에 근거하여 설계된 i번째 클러스터 중심패턴의 m번째 요소이며, r_{mp} 는 p번째 조합입력이나 실시간 입력의 m번째 요소이다. w_j 는 가중함수로써 결과의 정확성과 신뢰성을 증가시키기 위해서 도입된다. 여기에서는 저전압 문제의 중요도가 크므로 $V_{M,1}(i)$, $V_{P,2}(i)$ 에 대해 각각 0.9, 1.1로 설정한다.

3.2.2 퍼지추론 메카니즘 설계

퍼지추론은 기본적으로 퍼지집합간의 교집합(AND 연산자), 합집합(OR 연산자) 그리고 퍼지 관계식(Realtion)에 의해서 이루어진다. 먼저 7개의 언어변수들 {LN, MN, SN, VS, SP, MP, LP}로 표시되는 ULTC의 2개의 입력들에 대한 퍼지규칙들의 조건부 ν_i 에 대한 평가가 식 (8)의 AND 연산에 의해서 이루어진다.

$$\mu(\nu_i) = \min(\min(\mu(IM_{p1}), \mu(IM_{q2}))) \quad (8)$$

여기서 $\mu(x)$ 는 퍼지집합에서 멤버십 함수 x의 가능성 정도를 표시한다. 만약 퍼지 조건부의 모든 멤버십 값들과 퍼지 관계행렬이 주어지면 9개의 언어변수들 {XN, LN, MN, SN, VS, SP, MP, LP, XP}로 표시되는 출력 멤버십들에 대한 예에서 i번째 퍼지규칙 조건부 ν_i 에 대한 j번째 출력 멤버십 OM_j 에 대한 가능성 정도는 식 (9)로 얻을 수 있다.

$$\mu_{ULCP,i}(OM_j) = \min(\mu_R(\nu_i, OM_j), \mu(\nu_i)) \quad (9)$$

식 (8)은 모든 ν_i 에 대해 그리고 모든 출력 멤버십 함수들에 대해서 실행된다. 다음 j번째 출력 멤버십 함수 OM_j 의 최종 값은 AND 연산을 기반으로 하는 식 (10)의 퍼지 리레이션 규칙에 의해 얻어진다.

$$\mu_{ULCP}(OM_j) = \max(\min(\mu_R(\nu_i, OM_j), \mu(\nu_i))) \text{ for all } \nu_i \quad (10)$$

그리고 이 과정은 모든 출력 멤버십 함수에 대해서 반복되며, 최대 값을 가지는 출력 멤버십 함수에 대응하는 부하 중심점이 출력으로 선택된다.

3.3 온라인 퍼지 ULTC 제어기 설계 절차

앞에서 설명된 온라인 퍼지 ULTC 제어기 설계에 대한 단계적 절차는 그림 4와 같이 모두 14단계로 구성할 수 있다. 단계 1-10]은 온라인 전압관리 시스템의 전압관리 프로세스가 담당하나 단계 11-14]는 주변압기 IED가 담당한다.

단계 1] 전압관리 DB로부터뱅크별로 주어진 기간 동안의 부하패턴 데이터 $V_{M,1}(i)$, $V_{P,2,2}(i)$, $I(i)$ 그리고 ULTC 운전이력, 주변압기 및 배전변압기 탭 위치를 검색한다.

단계 2] 각 주상 변압기에 대해서 실측 데이터를 기반으로 최적탭을 결정, 보상된 전압 $V_{M,1(Tap)}(i)$, $V_{P,2,2(Tap)}(i)$ 을 얻는다.

단계 3] 각 주변압기에 대해서 $V_{M,1(Tap)}(i)$, $V_{P,2,2(Tap)}(i)$ 를 기반으로 최적탭을 결정, 보상된 전압 $V_{M,1(nTap)}(i)$, $V_{P,2,2(nTap)}(i)$ 를 얻는다.

단계 4] 최적탭으로 보상된 전압 $V_{M,1(nTap)}(i)$, $V_{P,2,2(nTap)}(i)$, 그리고 $I(i)$ 를 기반으로 식 (4-6)을 적용하여 다중의 부하패

턴 클러스터로 군집화한다.

단계 5] 첫번째 부하패턴 클러스터에 대해 식 (2-3)를 적용, 주어진 클러스터에 대한 부하 중심점(V_o, Z)를 계산한다.

단계 6] 모든 클러스터에 대해 각각의 부하 중심점을 계산하였으면 단계 7]로 간다. 반면에 그렇지 않으면 단계 5]로 가서 부하 중심점 결정 과정을 계속한다.

단계 7] 단계 4]를 통해서 얻어진 클러스터 중심점을 이용하여 입력들 $V_{M,1(nTap)}(i)$, $V_{P,2,2(nTap)}(i)$, $I(i)$ 에 대한 표준화된 입력을 얻는다.

단계 8] 입력 멤버십 함수의 언어변수의 수를 결정하고 기본 멤버십 함수 값을 결정한다. 필요에 따라 멤버십 함수 편집기를 이용하여 멤버십 함수 값을 변경할 수 있다.

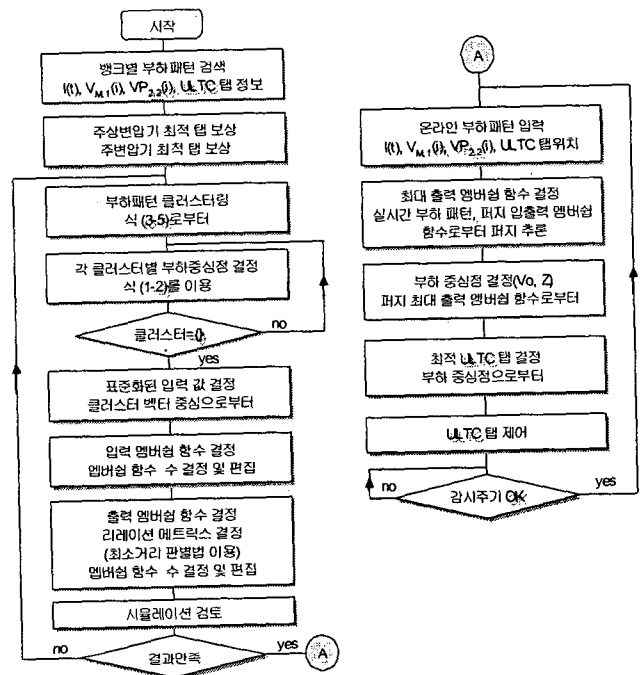


그림 4 온라인 퍼지 ULTC 제어기 설계절차
Fig. 4 On-line fuzzy ULTC controller design procedure

단계 9] 출력 멤버십 함수에 대한 언어변수의 수를 결정하고 최소거리 판별 기법 기반의 식 (7)을 적용하여 모든 퍼지규칙 조건부에 대한 퍼지 리레이션을 구한다.

단계 10] 검색된 기간동안의 모든 전압 이력 데이터 $V_{M,1}(i)$, $V_{P,2}(i)$, $I(i)$ 에 대해 퍼지 리레이션 규칙 식 (8-10)을 실행하여 모든 i에 대한 출력 멤버십 함수의 가능성 정도를 추론한다. 그리고 그 결과를 검토하여 정해진 퍼지 입력 멤버십 함수의 정확성을 검증한다. 만약, 그 결과가 만족스럽지 않으면 단계 4]로 가서 클러스터 수를 증가시킨다. 반면에 만족스러우면 입력 멤버십 함수와 리레이션 매트릭스 정보, 그리고 다중 부하 중심점 정보를 ULTC IED에 전송한다.

단계 11] ULTC IED는 온라인으로 전압 측정개소로부터 측정되는 $V_{M,1}(i)$, $V_{P,2}(i)$, $I(i)$ 에 대해 실시간 입력 멤버십 함수를 결정하여 모든 퍼지 조건부에 대해 그리고 모든 출력 멤버십 함수에 대해 퍼지 리레이션 규칙을 실시간으로 추론, 최대 출력의 멤버십 함수를 결정한다.

단계 12] 최대 출력 멤버십 함수로부터 부하 중심점(V_o , Z)을 결정한다.

단계 13] 온라인으로 입력되는 $I(i)$ 에 대해 부하 중심점을 기반으로 보상해야 할 전압 강하분을 계산, 최적한 ULTC 탭 위치를 결정하여 탭 위치를 제어한다.

단계 14] 정해진 주기가 완료되면 단계 11]로 가서 부하 변화에 따라 ULTC 탭 위치를 연속적으로 제어한다. 그렇지 않으면 대기한다.

4. 시뮬레이션 검토

본 연구에서는 새롭게 제안된 다중 부하 중심점 기반 퍼지 ULTC 제어 전략에 대한 유효성 검증을 위해 실시간 데이터, 퍼지 멤버십 함수 그리고 시뮬레이션 결과를 보일 수 있는 전압관리 시뮬레이션 툴을 개발하였다. 따라서 개발된 시뮬레이션 툴의 기능을 이용하여 먼저 시뮬레이션 환경을 구축하고, 실시간 퍼지 추론 과정을 통해 유효성을 검증한다.

4.1 시뮬레이션 환경 구축

시뮬레이션 환경 구축은 시뮬레이션 툴을 이용하여 실측 데이터 검색, 실측 부하 데이터 기반 부하패턴 클러스터링 및 클러스터별 부하중심점 계산, 표준화된 입력과 입력 멤버십 함수 결정 그리고 출력 멤버십 함수 및 퍼지 리레이션 행렬 결정과정으로 이루어진다.

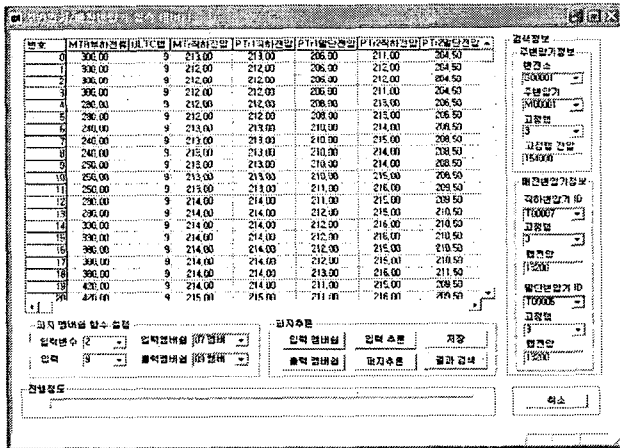


그림 5 실측 데이터 화면
Fig. 5 measured data view

4.1.1 실측 데이터 검색

먼저, 시뮬레이션 검증을 위해 주변압기 고정탭 위치, 3일 간의 주변압기 부하전류 데이터 $I(t)$, 주변압기 ULTC의 운전 이력, 주변압기 송출전압 $V_{M1}(i)$, 선로직하 주상 변압기 PTR1의 직하전압과 말단전압 $V_{P11}(i)$, $V_{P12}(i)$ 그리고 선로말단 주상 변압기 PTR2의 직하전압과 말단전압 $V_{P21}(i)$, $V_{P22}(i)$ 그리고, PTR1, PTR2의 고정탭 위치를 검색한다. 그림 5는 시뮬레이션을 위해 검색된 데이터를 보이는데, 우측의 화면은 주변압기, PTR1, PTR2의 탭 위치와 탭 전압을 표시한다.

다중 부하중심점에 기반한 온라인 퍼지 ULTC 제어기 설계에 대한 연구

4.1.2 부하패턴 클러스터링 및 클러스터별 부하중심점

그림 5에 보인 실측 데이터를 기반으로 최대-최소거리 클러스터링 기법을 이용하여 실측 데이터를 클러스터별로 군집화하고 클러스터 중심점을 구한다.

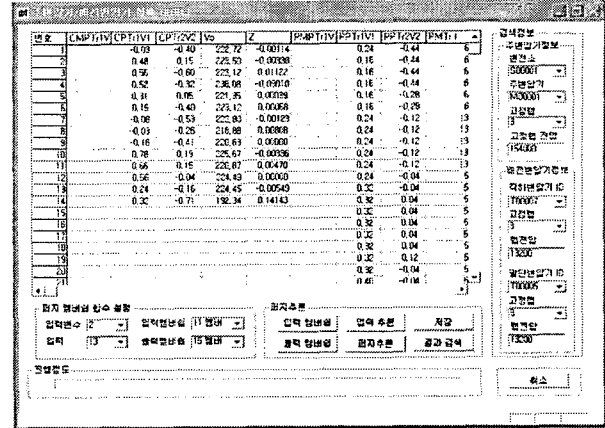


그림 6 클러스터링 결과
Fig. 6 Clustering Results

그리고 이들 군집화된 전압패턴 {PTR1V1, PTR2V2}의 정보를 이용하여 각 클러스터별로 고정 부하 중심점 계산 방식에 근거하여 부하 중심점 전압 V_o 와 임피던스 Z 를 계산한다. 그림 6에서 PTR1V1, PTR2V2는 표준화된 주변압기 직하 변태의 직하 전압과 말단 주상 변압기의 말단전압을 표시하며 클러스터는 군집화된 클러스터 정보, CPT1V1, CPT2V2는 그 클러스터들의 중심점을 표시한다.

4.1.3 표준화된 입력과 입력 멤버십 함수 결정

부하패턴 클러스터링 및 클러스터별 부하중심점 계산 절차에 근거하여 얻어진 클러스터별 중심점을 바탕으로 표준화된 입력을 설정하고 입력 멤버십 함수를 결정한다. 여기에서는 입력변수를 $V_{M1}(i)$, $V_{P22}(i)$ 로 하기 때문에 표준화된 입력변수 수를 2로 하였으며, 클러스터링 결과를 바탕으로 입력수는 13개, 입력 멤버십 함수 수는 11개 그리고 출력 멤버십 함수 수는 15개로 하였다. 이때 입력 멤버십 함수는 시뮬레이션 툴 기능에 의해 그림 7과 같이 자동 결정된다.

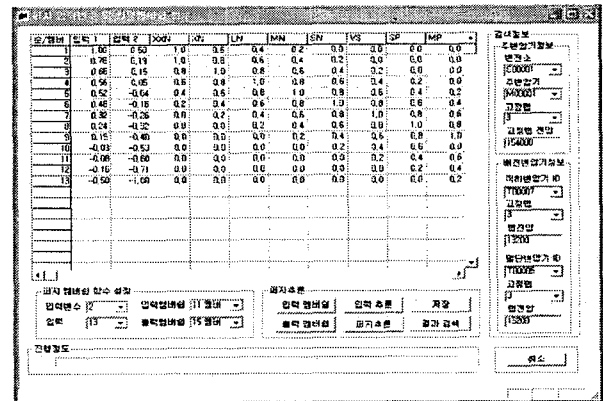


그림 7 표준화된 입력과 입력 멤버십 함수 결정 결과
Fig. 7 Normalized inputs and input membership function decision results

4.1.4 출력 멤버십 함수 및 퍼지 리레이션 행렬 결정

출력 리레이션 행렬은 앞에서 결정된 입력 멤버십 함수 (XXN, XN, LN, MN, SN, VS, SP, MP, LP, XP, XXP)에 대해 생성되는 총 121개의 퍼지 규칙들의 조건부에 대해 각각 최소거리판별 기법을 적용, 최적 출력 멤버십 함수와의 관계를 결정하도록 하였다. 그림 8은 시뮬레이션 틀에 의해서 생성된 출력 및 퍼지 리레이션 행렬의 일부를 보인다.

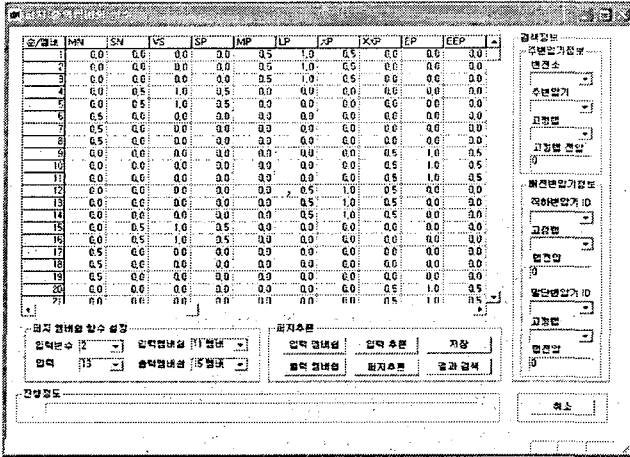


그림 8 퍼지 출력 멤버십 함수 및 리레이션 행렬
Fig. 8 Fuzzy output membership and relation matrix

4.2 실시간 퍼지 추론 시뮬레이션

본 절에서는 실측 전압패턴, 주변압기 최적 탭으로 보정된 전압패턴, 기존 고정 부하 중심점에 기반한 ULTC 제어시 전압패턴, 본 연구에서 제안된 실시간 퍼지 ULTC 제어기에 의해서 ULTC 제어시 얻어지는 전압패턴을 보임으로써 제안된 전력의 유효성을 보인다.

4.2.1 실측 전압파형 및 최적탭에 의해서 보상된 전압파형

그림 9는 시뮬레이션을 위해 제공되는 초기 실측 전압파형을 보인다. $V_{M,1}(i)$ 및 $V_{P,2}(i)$ 가 상당히 저전압 문제를 경험하고 있음을 확인할 수 있다.

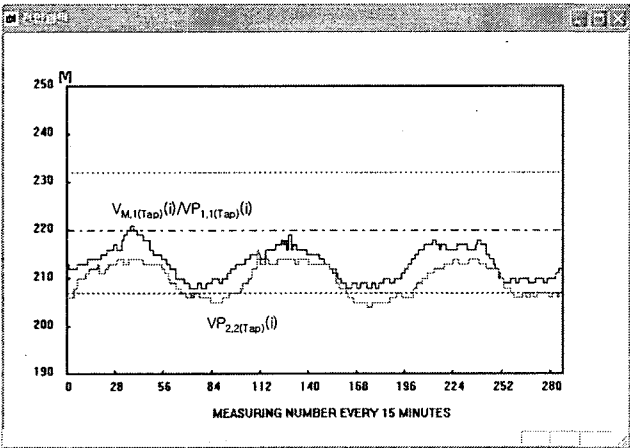


그림 9 초기 실측 전압 파형
Fig. 9 The measured voltage waveform

반면에 그림 10은 주변압기 고정탭에 의해서 보상된 전압파형을 보이는데, $V_{M,1(nTap)}(i)$, $V_{P,2(nTap)}(i)$ 는 각각 주변압기 최적 NLTC 탭에 의해서 보상된 주변압기 직하 송출전압과 PTR2의 말단전압이다. 그림 10은 주변압기 NLTC 탭에 의해서 전압이 보상되었으나 직하전압이 거의 허용전압의 한치에 접근하였으며 전압편차가 심각함을 보인다.

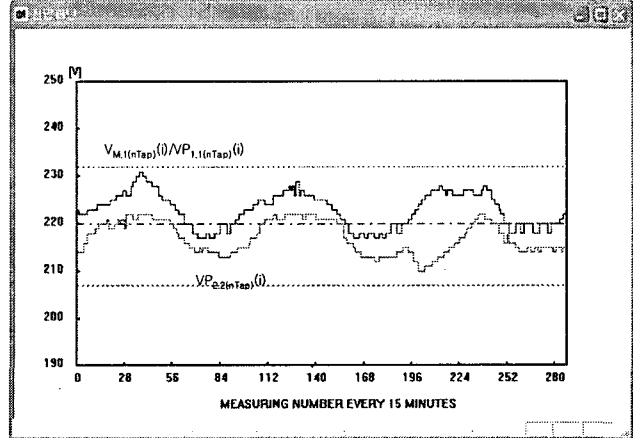


그림 10 주변압기 최적 고정탭의 의해서 보상된 전압파형
Fig. 10 Voltage waveform compensated by the optimal NLTC tap of MTr.

4.2.2 기존 고정 부하 중심점 기반 ULTC 보상 전압 파형

그림 10에 보인 전압 파형에 대해 그림 11은 기존의 고정 부하중심점에 의해서 보상된 전압파형을 보인다. 그림 11에서 고정 부하 중심점 기반의 ULTC 보상에 의해서 보상되는 주변압기 직하 송출전압 $V_{M,1(ULTC)}(i)$ 은 주변압기 부하전류의 변화에 따라 전압 강하분을 실시간으로 보상, 부하 중심점 전압을 비교적 잘 추종함을 알 수 있다. 그러나 이 경우, PTR2의 말단 전압 $V_{P,2(ULTC)}(i)$ 이 하한 전압보다 낮아짐으로써 일반 수용가에게 부적정 전압이 공급됨을 알 수 있다. 그림 11에서 FLTC는 고정 부하 중심점(Fixed Load Center Point)을 표시한다.

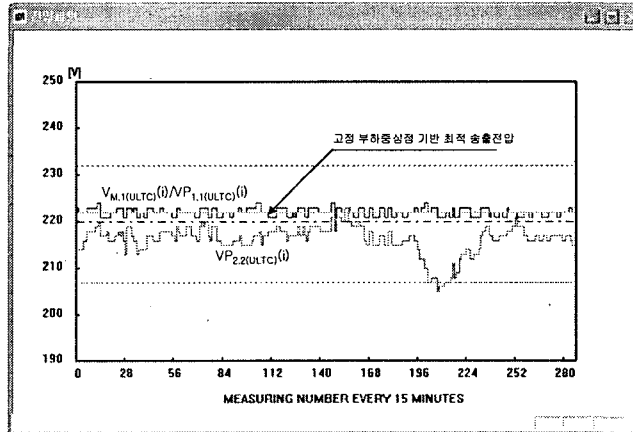


그림 11 고정 부하중심점 기반 ULTC에 의해서 보상된 전압파형
Fig. 11 Voltage waveform compensated by ULTC based on the FLCP

4.2.3 다중 부하 중심점 기반 퍼지 ULTC 보상 전압 파형

그림 11의 전압 문제는 본 연구에서 제안된 다중 부하 중심점 기반의 퍼지 ULTC 제어 기법에 의해서 해결될 수 있다. 그림 12는 다중 부하 중심점 기반 ULTC 제어에 의해서 보상된 전압 파형을 보이는데, 그림 11에 보인바와는 다르게 부하변화에 따라 부하 중심점이 다중 부하 중심점중에 적절한 위치로 이동하고 동시에 ULTC가 이 부하 중심점을 따라 전압을 보상, 주변압기 직하 송출전압이 다중 부하 중심점 기반 최적 송출전압을 추종, 직하 송출전압은 물론 PTr2의 말단전압이 모두 220V에 최적하게 분포되어 부적정 전압 문제가 해결됨을 확인할 수 있다. 그림 12에서 MLTC는 다중 부하 중심점을 표시한다.

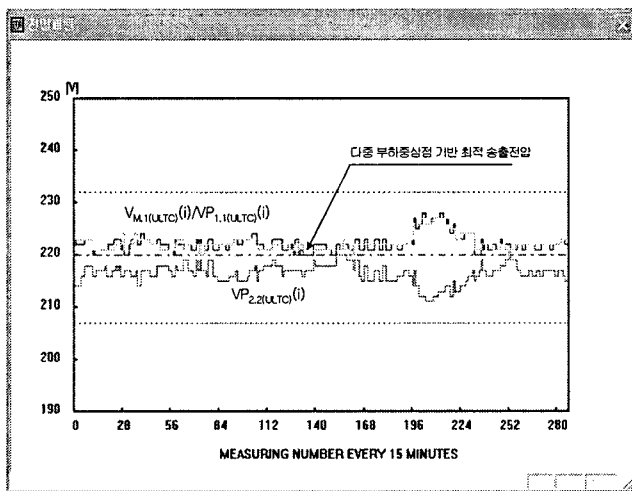


그림 12 다중 부하중심점 기반 ULTC에 의해서 보상된 전압파형
Fig. 12 Voltage waveform compensated by ULTC based on the MLCP

5. 결 론

본 연구에서는 클러스터링 기법을 도입하여 실측 데이터로부터 다중의 부하 중심점을 설계하고, 퍼지기법을 기반으로 부하변화에 따라 실시간으로 부하중심점을 설계된 다중 부하 중심점 중의 적절한 위치로 이동시킴으로써 부하변화를 효율적으로 추적, 주변압기 ULTC의 전압보상능력을 개선하고 전압편차를 최소화할 수 있도록 하는 다중 부하중심점 기반 온라인 퍼지 ULTC 제어기를 새롭게 제안하였다. 부하 중심점 군집화를 위한 클러스터링 기법으로는 최대, 최소거리 기법을 채택하였으며, 퍼지 출력 멤버십 함수 결정을 위해서는 최소거리 분류기를 채택하였다. 끝으로 개발된 시뮬레이션 툴을 이용하여 3일간 데이터를 기반으로 하는 퍼지 입력력 멤버십 함수를 설계하였으며, 시뮬레이션을 통해 기존의 고정 부하중심점 방식과 제안된 다중 부하중심점 기반의 퍼지 ULTC 제어 방식의 전압보상능력을 비교하였는데, 제안된 방법이 기존의 방법에 비해 ULTC 전압 보상능력을 크게 개선함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2005-7-095) 주관으로 수행된 과제임

참 고 문 헌

- [1] 배전전압 관리개선을 위한 전압조정장치최적운용연구, 한전연구소보, 1985.
- [2] 전압관리 기법의 효율화 방안에 관한 연구, 한전연구소보, 1988.
- [3] H. Kim and D. Rho, "A Study on the Optimal Operation Method of Voltage Regulator at Distribution Substation", 1989 IFAC Symposium on Power Plant Control, pp 145-149, 1989.
- [4] 고윤석외 3인, "차세대 디지털 적산전력계 개발", 전기학회논문지, Vol. 21, No. 2, pp. 541-551, 2004년 8월.
- [5] 고윤석, 하복남, "차세대 디지털 적산전력계에 기반한 배전원격관리 시스템 설계 및 프로그램 개발, 전기학회 논문지, Vol. 54, No. 4, pp. 185-192, 2005년 4월.
- [6] D. Feucht, "Pattern Recognition : Basic Concepts and Implementations", Computer Design, pp. 57-68, December 1968.
- [7] L.A. ZADEH, "Fuzzy Sets", Information and Control, pp. 28-44. Feb. 1965.
- [8] Y. Y. Hsu and C. H. Cheng, "Design of Fuzzy Power System Stabilizers for Multi-Machine Power Systems", IEEE PROCEEDINGS, Vol. 137, No. 3, pp. 233-238, 1990.
- [9] D. A. Linkens, S. B. Hasnain, "Self-Organising Fuzzy Logic Control and Application to Muscle Relaxant Anesthesia", IEE PROCEEDINGS-D, Vol. 138, No. 3, pp. 274-284, May 1991.
- [10] K. L. Tang and R. J. Mulholland, "Comparing fuzzy logic with classical control designs", IEEE Trans., 1987, SMC-17, pp. 1085-1087.

저 자 소 개



고 윤 석 (高 銳 錫)

1984년 2월 광운대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1986년 3월~1996년 3월 한국전기연구소 선임연구원. 1996년 4월~1997년 2월 포스코 경영연구소 연구위원. 1997년 3월~현재 남서울대학교 전자정보통신공학부 부교수.